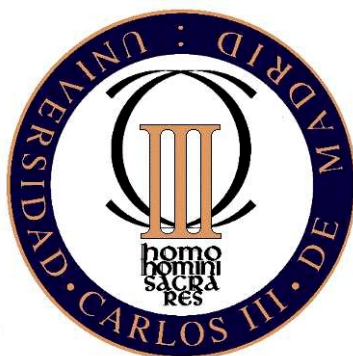


**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

Departamento de Ingeniería Mecánica



**INGENIERÍA INDUSTRIAL**

PROYECTO FIN DE CARRERA

***ENSAYOS DE ATROPELLO DE  
PEATONES. DESCRIPCIÓN Y  
SIMULACIÓN***

**AUTOR: JAIME CONDES NOVILLO**

**TUTOR: JOSÉ LUIS SAN ROMÁN GARCÍA**

LEGANÉS, ABRIL 2009





## ***Agradecimientos***

En Julio de 2005 escribí lo siguiente: "Espero tener otra oportunidad similar, dentro de no mucho tiempo, de poder dar las gracias a muchas más personas". Con estas palabras finalizaba los agradecimientos en el Proyecto Fin de Carrera de Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica. Bien, pues unos años más tarde, ahora tengo esa oportunidad.

De nuevo, debo y quiero comenzar por agradecer a mis padres (Manuel y Asunción) el gran esfuerzo y sacrificio que han mantenido durante estos últimos 18 años, para que sus hijos Manuel, Félix y el que escribe, pudiésemos terminar los estudios universitarios que decidimos comenzar con todo su apoyo e ilusión. Después de todos estos años por fin se ha cerrado esta etapa de nuestra vida. Y sé que están muy orgullosos de nosotros, pero creo no que más de lo que nosotros estamos de ellos. Quiero agradecer también a mis hermanos toda la ayuda y consejos que me han aportado, sobre todo, en estos últimos meses y semanas. Sin duda, todo ha sido mucho más fácil gracias a vosotros.

Tengo que dar las gracias a mi tutor del proyecto, José Luis San Román, por todo el interés mostrado y su dedicación desde el primer momento en el que *"de la nada"* surgió este Proyecto Fin de Carrera, y que poco a poco fuimos *"dando forma"* hasta conseguir el resultado final.

Requiere una mención especial toda la ayuda y el gran compañerismo que he encontrado durante esta segunda etapa universitaria, sin olvidar también los muy buenos momentos que hemos pasado. Sois tant@s que creo que me olvidaría de más de un@ y es algo que no quiero, así que espero que con la siguiente frase tod@s os deis por aludid@s. Gracias colegas ingenier@s técnic@s y ya sabéis, *"trabajo en equipo"*.

Durante estos últimos meses dedicados exclusivamente a la realización de este proyecto he notado los ánimos que familiares y amigos me han transmitido, y que gracias a ellos, en momentos de desánimo me han servido para seguir adelante. Así que, gracias de verdad.

Y para terminar quiero agradecer a Rus, Raquel, Rafa, Irene y Alfredo, *"mis cinco voluntari@s"*, el gran apoyo que he recibido por vuestra parte durante este sprint final de la carrera. Y en especial a vosotras dos (RR), porque además de vuestro apoyo y compañerismo, me habéis hecho muy amenas esas largas mañanas mientras *"proyectaba"* en soledad.

***Jaime***



# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO</b>	<b>3</b>
<b>1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO</b>	<b>3</b>
<b>2. INFORMACIÓN GENERAL SOBRE LOS ATROPELLOS</b>	<b>5</b>
<b>2.1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
<b>2.2 ESTADÍSTICAS DE ATROPELLOS</b>	<b>7</b>
2.2.1 Situación en el Mundo	7
2.2.2 Situación en Europa	11
2.2.3 Situación en España	15
<b>2.3 LESIONES</b>	<b>20</b>
2.3.1 Biomecánica lesional del peatón	20
2.3.1.1 Acercamiento epidemiológico a las lesiones observadas en peatones atropellados	21
2.3.1.2 Análisis de las lesiones producidas por el atropello por registros anatómicos	25
<b>2.4 FASES DE UN ATROPELLO</b>	<b>33</b>
2.4.1 Preimpacto	34
2.4.2 Impacto	39
2.4.3 Movimiento del peatón sobre el suelo	41
<b>2.5 TIPOLOGÍAS DEL ATROPELLO</b>	<b>42</b>
2.5.1 Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	43
2.5.2 Proyección hacia delante (forward projection)	44
2.5.3 Trayectoria de volteo sobre la aleta (fender vault)	45
2.5.4 Trayectoria de volteo sobre el techo (roof vault)	45
2.5.5 Salto mortal (somersault)	46
<b>2.6 CAUSAS DE LOS ATROPELLOS</b>	<b>47</b>
<b>2.7 MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN DE ATROPELLOS</b>	<b>54</b>
2.7.1 Medidas legales	54
2.7.2 Medidas en infraestructuras	56
2.7.3 Medidas en educación, divulgación y concienciación	58
2.7.4 Medidas técnicas adoptadas en los vehículos	60

<b>3.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>63</b>
<b>3.2</b>	<b>REGULACIÓN DE LOS ENSAYOS DE ATROPELLO</b>	<b>65</b>
3.2.1	Directivas europeas	65
3.2.1.1	Directiva 2003/102/CE	66
3.2.1.1.1	EEVC	68
3.2.1.1.2	Prescripciones Técnicas de la Directiva 2003/102/CE	69
3.2.1.1.2.1	Ensayos pierna tibia-parachoques	72
3.2.1.1.2.2	Ensayos muslo-parachoques	74
3.2.1.1.2.3	Ensayos muslo-borde delantero del capó	75
3.2.1.1.2.4	Ensayos de cabeza de adulto-parabrisas	77
3.2.1.1.2.5	Ensayos de cabeza de niño y adulto-parte superior del capó	78
3.2.2	Organismos NCAP	81
3.2.2.1	EuroNCAP	81
3.2.2.1.1	Ensayos	82
3.2.2.1.1.1	Ensayo frontal	83
3.2.2.1.1.2	Ensayo lateral	83
3.2.2.1.1.3	Ensayo de poste	84
3.2.2.1.1.4	Ensayo de atropello	84
<b>3.3</b>	<b>SUBSISTEMAS O IMPACTADORES</b>	<b>87</b>
3.3.1	Impactador simulador de miembro inferior	89
3.3.2	Impactador simulador de muslo y pelvis	91
3.3.3	Impactadores simuladores de cabeza	93
3.3.4	Normas ISO	95
<b>3.4</b>	<b>SISTEMAS DE TAMAÑO REAL</b>	<b>97</b>
3.4.1	Crash Test Dummies	99
3.4.1.1	Fabricantes de Crash Test Dummies	103
3.4.1.2	Historia de los Crash Test Dummies	104
3.4.1.3	Tipos de Crash Test Dummies	109
3.4.1.3.1	Dummies empleados en pruebas de impacto frontal	109
3.4.1.3.1.1	Hybrid III	109
3.4.1.3.1.2	THOR	110
3.4.1.3.2	Dummies empleados en pruebas de impacto lateral	114
3.4.1.3.2.1	SID	114
3.4.1.3.3	Dummy empleado en pruebas de impacto trasero	115
3.4.1.3.3.1	BioRID II	115
3.4.1.3.4	Dummies empleados en pruebas de atropello	116
3.4.1.3.4.1	HYBRID III PEDESTRIAN	117
3.4.1.3.4.2	POLAR II	120
<b>3.5</b>	<b>SIMULACIÓN POR ORDENADOR</b>	<b>125</b>
3.5.1	Tipos de programas	127

3.5.2	Programas de simulación	130
3.5.2.1	MADYMO	130
3.5.2.2	LS-DYNA	132
3.5.2.3	PAM-CRASH	134
3.5.2.4	PC-CRASH	135
3.5.2.5	Otros programas	137

#### **4. SIMULACIÓN DE UN ATROPELLO** **138**

##### **4.1 INTRODUCCIÓN** **138**

##### **4.2 PC-CRASH** **139**

4.2.1	Características principales	140
4.2.2	Modelización del entorno	142
4.2.3	Modelización del vehículo	143
4.2.4	Modelización del peatón	145

#### **5. PARTE EXPERIMENTAL** **153**

##### **5.1 INTRODUCCIÓN** **153**

##### **5.2 PREPARACIÓN DE LAS SIMULACIONES** **155**

5.2.1	Definición de los parámetros básicos de simulación	155
5.2.2	Elección y modelización de los vehículos	160
5.2.3	Configuración del modelo de peatón empleado	167

##### **5.3 DETERMINACIÓN DE LA TIPOLOGÍA DE ATROPELLO SEGÚN EL TIPO DE VEHÍCULO Y VELOCIDAD** **169**

5.3.1	Preparación de las simulaciones	170
5.3.2	Resultados	174
5.3.2.1	Tipologías de Atropello para un Turismo medio	175
5.3.2.2	Tipologías de Atropello para un Monovolumen	178
5.3.2.3	Tipologías de Atropello para un SUV	180
5.3.2.4	Tipologías de Atropello para un Deportivo	182
5.3.2.5	Tipologías de Atropello para un Furgón comercial	184
5.3.2.6	Tipologías de Atropello para un Camión	186
5.3.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	188
5.3.3.1	Conclusiones	191

##### **5.4 DETERMINACIÓN DEL DAÑO SUFRIDO POR UN PEATÓN EN UN ATROPELLO A 50 KM/H** **196**

5.4.1	Preparación de las simulaciones	197
5.4.2	Resultados	199
5.4.2.1	Daño producido por un Turismo medio	202
5.4.2.2	Daño producido por un Monovolumen	203
5.4.2.3	Daño producido por un SUV	204

5.4.2.4	Daño producido por un Deportivo	205
5.4.2.5	Daño producido por un Furgón Comercial	206
5.4.2.6	Daño producido por un Camión	207
5.4.3	Análisis de resultados y conclusiones	208
5.4.3.1	Conclusiones	213
<b>6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>		<b>219</b>
<b>6.1 CONCLUSIONES</b>		<b>219</b>
<b>6.2 TRABAJOS FUTUROS</b>		<b>222</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>224</b>
<b>7.1 LIBROS Y ARTÍCULOS</b>		<b>224</b>
<b>7.2 OTRAS FUENTES</b>		<b>226</b>
<b>8. ANEXOS</b>		<b>232</b>
<b>8.1 ANEXO I</b>		<b>232</b>
<b>8.2 ANEXO II</b>		<b>257</b>
<b>8.3 ANEXO III</b>		<b>270</b>

## ***Índice de gráficos***

Gráfico 2.1 - Número de fallecidos en atropello por millón de habitantes en algunos países europeos (Año 2005).....	12
Gráfico 2.2 – Número de fallecidos, por millón de habitantes, atropellados fuera de los pasos de peatones .....	13
Gráfico 2.3 – Porcentaje de víctimas mortales en atropellos respecto al número total de fallecidos en accidentes de tráfico (Año 2005) .....	14
Gráfico 2.4 – Distribución de accidentes en carretera y zona urbana (Año 2006).....	15
Gráfico 2.5 - Evolución de las víctimas de atropello en España durante los últimos años .....	17
Gráfico 2.6 – Distribución de los peatones víctimas de atropello según su edad en España (Año 2006).....	18
Gráfico 2.7 – Curva de correlación entre el Riesgo de lesiones cerebrales y el índice HIC a 15 ms. ....	27
Gráfico 2.8 – Distribución de las víctimas producidas en atropellos en España (Año 2004).....	32
Gráfico 2.9 – Porcentaje de cada tipo de trayectoria postcolisión posible seguidas por los peatones en casos de atropello .....	43
Gráfico 2.10 – Probabilidad de sufrir una herida grave en un atropello en función de la velocidad.....	51
Gráfico 3.1 - Velocidad de los ensayos muslo-borde delantero del capó en función de la forma del vehículo.....	75
Gráfico 3.2 - Ángulo de los ensayos muslo-borde delantero del capó en función de la forma del vehículo.....	76
Gráfico 3.3 - Energía cinética de los ensayos muslo-borde delantero del capó en función de la forma del vehículo.....	76
Gráfico 5.1 – Resultados de la simulación con un tiempo de integración de 5 milisegundos .....	158
Gráfico 5.2 – Resultados de la simulación con un tiempo de integración de 1 milisegundo.....	158
Gráfico 5.3 – Resultados de la simulación con un tiempo de integración de 0.5 milisegundos .....	159
Gráfico 5.4 – Ejemplo de la recopilación manual de datos a partir de los resultados gráficos ofrecidos por PC-CRASH .....	177
Gráfico 5.5 – Ejemplo de la recopilación manual de datos a partir de los resultados gráficos ofrecidos por PC-CRASH .....	200
Gráfico 5.6 – Daño provocado en la cabeza del peatón por cada uno de los vehículos .....	216

## ***Índice de tablas***

Tabla 2.1 - Países y entidades integrantes de IRTAD (International Road Traffic and Accidente Database).....	8
Tabla 2.2 – Distribución de los peatones fallecidos en los últimos años en los países miembros de IRTAD .....	10
Tabla 2.3 - Número total de fallecidos en atropellos (Año 2005).....	12
Tabla 2.4 – Evolución de los peatones atropellados fallecidos en las carreteras españolas durante los últimos años .....	15
Tabla 2.5 – Distribución de los fallecidos en carretera en España, en función del tipo de accidente.....	16
Tabla 2.6 – Distribución de los fallecidos en zona urbana en España, en función del tipo de accidente .....	16
Tabla 2.7 – Distribución de las víctimas de atropello en carretera según su condición, en España (Año 2004).....	18
Tabla 2.8 – Distribución de las víctimas de atropello en zona urbana según su condición, en España (Año 2004) .....	18
Tabla 2.9 – Distribución de las lesiones (AIS 2-6) apreciadas en peatones atropellados .....	22
Tabla 2.10 – Correspondencia entre los niveles de la escala AIS, su severidad y fatalidad.....	22
Tabla 2.11 – Ejemplos de lesiones según su nivel en la escala AIS .....	23
Tabla 2.12 - Valores límite de las fuerzas y momentos aplicados a las extremidades inferiores.....	32
Tabla 2.13 – Fases generales de un accidente de tráfico.....	36
Tabla 2.14 – Distribución del número de accidentes en carretera según el estado del vehículo, en España (Año 2004) .....	49
Tabla 2.15 – Distribución del número de accidentes en zona urbana según el estado del vehículo, en España (Año 2004).....	50
Tabla 2.16 - Infracciones cometidas por los peatones víctimas de atropellos, en España (Año 2004).....	53
Tabla 3.1 - Distribución de las heridas de los peatones atropellados .....	87
Tabla 3.2 – Niveles de tolerancia de las diferentes partes del cuerpo .....	88
Tabla 3.2 – Distribución de la masa del Thor en las diferentes partes del cuerpo .....	111
Tabla 3.3 – Instrumentación del Thor .....	112
Tabla 3.4 – Diferencias constructivas entre los dummies Hybrid III y Thor .....	113
Tabla 3.5 – Distribución de la masa del Hybrid III Pedestrian y algunas dimensiones.....	118
Tabla 3.6 – Instrumentación del Hybrid III .....	119
Tabla 3.7 – Distribución de la masa del POLAR II.....	121
Tabla 3.8 – Instrumentación del POLAR II.....	122



Tabla 4.1 – Ejemplo de valores antropométricos correspondiente a un individuo masculino medio de 84kg. y 1.90 m.....	148
Tabla 5.1 – Configuraciones de vehículo-peatón empleadas para las simulaciones de evaluación de la tipología de atropello.....	173
Tabla 5.2 – Resumen de las simulaciones llevadas a cabo para determinar la tipología de atropello .....	173
Tabla 5.3 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 2 para el turismo medio.....	175
Tabla 5.4 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 4 para el turismo medio.....	176
Tabla 5.5 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 7 para el turismo medio.....	176
Tabla 5.6 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 2 para el monovolumen.....	178
Tabla 5.7 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 4 para el monovolumen.....	179
Tabla 5.8 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 7 para el monovolumen.....	179
Tabla 5.9 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 2 para el SUV .....	180
Tabla 5.10 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 4 para el SUV.....	180
Tabla 5.11 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 7 para el SUV.....	181
Tabla 5.12 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 2 para el deportivo .....	182
Tabla 5.13 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 4 para el deportivo .....	182
Tabla 5.14 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 7 para el deportivo .....	183
Tabla 5.15 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 2 para el furgón comercial.....	184
Tabla 5.16 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 4 para el furgón comercial.....	184
Tabla 5.17 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 7 para el furgón comercial.....	185
Tabla 5.18 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 2 para el camión .....	186
Tabla 5.19 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 4 para el camión .....	186
Tabla 5.20 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 7 para el camión .....	187

Tabla 5.21 – Configuraciones de vehículo-peatón empleadas para las simulaciones de evaluación de la tipología de atropello.....	198
Tabla 5.22 – Resultados del daño producido en el atropello a 50 km/h con el turismo medio .....	202
Tabla 5.23 – Resultados del daño producido en el atropello a 50 km/h con el monovolumen.....	203
Tabla 5.24 – Resultados del daño producido en el atropello a 50 km/h con el SUV...	204
Tabla 5.25 – Resultados del daño producido en el atropello a 50 km/h con el deportivo .....	205
Tabla 5.26 – Resultados del daño producido en el atropello a 50 km/h con el furgón comercial.....	206
Tabla 5.27 – Resultados del daño producido en el atropello a 50 km/h con el camión .....	207
Tabla 5.28 – Resultados del daño producido por cada vehículo expresado en términos de aceleración media.....	208
Tabla 5.29 – Resultados del daño producido por los distintos vehículos en el caso de la Configuración C a 50 km/h.....	209

# ***Índice de figuras***

Figura 2.1 – Regiones del cuerpo lesionadas y trayectorias de la cabeza .....	24
Figura 2.2 – Distribución de las lesiones corporales por atropello y las zonas del vehículo que las producen.....	24
Figura 2.3 - Lesiones principales producidas de las extremidades inferiores del peatón a consecuencia del atropello .....	31
Figura 2.4 - El momento del impacto en un atropello a un peatón .....	39
Figura 2.5 - Trayectoria de envolvimiento (Wrap Trayectory) .....	43
Figura 2.6 - Proyección hacia delante (Forward Projection) .....	44
Figura 2.7 - Volteo sobre la aleta (Fender Vault).....	45
Figura 2.8 - Volteo sobre el techo (roof vault).....	46
Figura 2.9 - Trayectoria de salto mortal (Somersault).....	46
Figura 2.10 – Paso de peatones de distinto nivel (Pasarela elevada).....	56
Figura 2.11 – Paso de peatones integrado.....	57
Figura 2.12 – Ejemplo de la campaña de concienciación en una calle de Madrid y su eslogan .....	59
Figura 2.13 – Esquema de funcionamiento del sistema de detección de obstáculos de algunos vehículos.....	60
Figura 2.14 – Distintos diseños de capós .....	61
Figura 2.15 – Ejemplos de airbag situados en el frontal del vehículo para proteger al peatón en caso de atropello .....	61
Figura 2.16 – Sistema pop-up .....	62
Figura 3.1 - Determinación de la línea de referencia superior del parachoques .....	70
Figura 3.2 – Determinación de la línea de referencia inferior del parachoques .....	70
Figura 3.3 – Determinación del ángulo del parachoques .....	70
Figura 3.4 – Determinación de la distancia perimétrica .....	71
Figura 3.5 – Determinación de la línea de referencia del borde delantero del capó.....	71
Figura 3.6 – Determinación de la línea de referencia lateral del capó .....	72
Figura 3.7 – Ensayos miembro inferior-parachoques.....	73
Figura 3.8 – Ensayos muslo-borde delantero del capó .....	77
Figura 3.9 – Localización de los impactos realizados en los ensayos en función de la geometría del vehículo.....	80
Figura 3.10 – Ensayo frontal EuroNCAP .....	83
Figura 3.11 – Ensayo lateral EuroNCAP .....	83
Figura 3.12 – Ensayo lateral de poste EuroNCAP .....	84
Figura 3.13 – Resultado del ensayo de atropello de EuroNCAP del Citroën C6 (Año 2005).....	85
Figura 3.14 – División realizada por EuroNCAP en sus ensayos de atropello.....	85
Figura 3.15 – Detalle del impactador de miembro inferior .....	89
Figura 3.16 – Ensayo realizado con el impactador de miembro inferior.....	90

Figura 3.17 - Esquema del impactador de miembro inferior .....	90
Figura 3.18 – Detalle del impactador de muslo y pelvis.....	91
Figura 3.19 - Ensayo realizado con el impactador de muslo y pelvis.....	92
Figura 3.20 - Esquema del impactador simulador de muslo y pelvis .....	92
Figura 3.21 – Esquema del impactador de cabeza de adulto .....	93
Figura 3.22 – Esquema del impactador de cabeza de niño .....	94
Figura 3.23 - Ensayo realizado con el impactador de cabeza .....	95
Figura 3.24 – Esquema resumen de los diferentes ensayos realizados con impactadores o subsistemas, propuestos por EEVC WG17.....	95
Figura 3.25 – Ensayo de atropello con catapulta impulsora y dummy.....	98
Figura 3.26 - Zona de impacto de la cabeza del peatón en función de la velocidad del vehículo .....	99
Figura 3.27 – A.T.D o Crash Test Dummy.....	100
Figura 3.28 – Dummy “Sam”, de la empresa Sierra Engineering .....	104
Figura 3.29 – Dummy OSCAR (Año 1949) .....	105
Figura 3.30 – Dummy GARD (Año 1960) .....	105
Figura 3.31 – Familia Hybrid III, con todas sus versiones .....	107
Figura 3.32 – Distintas versiones de dummies de impacto lateral .....	107
Figura 3.33 – Detalle de la estructura interna del Hybrid III.....	110
Figura 3.34 – Dummy THOR, Test device for Human Occupant Restraint.....	111
Figura 3.35 – SID (Side Impact Dummy).....	114
Figura 3.36 – BioRID II.....	115
Figura 3.37 – Versión Hybrid III Pedestrian percentil 50% y el kit de conversión simplificado .....	117
Figura 3.38 – Detalle tecnológico del Polar II.....	120
Figura 3.39 – Dimensiones del POLAR II .....	121
Figura 3.40 – POLAR III.....	123
Figura 3.41 – Comparativa de los detalles constructivos de POLAR II y POLLAR III..	123
Figura 3.42 – Ensayo de validación de un modelo de dummy sometido a un ensayo de atropello ( <i>Anderson</i> ).....	126
Figura 3.43 – Ejemplos de simulaciones de ensayos de atropello.....	127
Figura 3.44 – Ejemplos de utilización de elementos finitos en simulación .....	128
Figura 3.45 – Ejemplos de utilización de multicuerpos en simulación .....	129
Figura 3.46 – Modelización con elementos finitos y multicuerpos de un mismo sistema real.....	129
Figura 3.47 – Ejemplos del uso de MADYMO en simulaciones de crash test.....	131
Figura 3.48 – Dummies desarrollados con MADYMO.....	131
Figura 3.49 – Ensayo de atropello utilizando multicuerpos realizado con MADYMO...	132
Figura 3.50 – Ensayos de atropello con impactadores realizado con LS-DYNA.....	133
Figura 3.51 – Ensayo de atropello a escala real realizado con LS-DYNA.....	134
Figura 3.52 – Ejemplo de aplicación de PAM-CRASH en la evaluación de la seguridad interior de un vehículo.....	134

Figura 3.53 – Ensayos de atropello con impactadores realizado con PAM-CRASH .....	135
Figura 3.54 – Ensayo de atropello utilizando multicuerpos, realizado con PC-CRASH	136
Figura 3.55 – Comparación de resultados entre MADYMO (arriba) y PC-CRASH (abajo) .....	136
Figura 4.1 – Pantalla principal de PC-CRASH.....	140
Figura 4.2 – Ejemplo de la información técnica disponible para cada vehículo de la base de datos de PC-CRASH .....	141
Figura 4.3 – Ejemplo de modelización de un entorno urbano con distintos elementos .....	142
Figura 4.4 – Modelo de simplificado de vehículo, realizado con MADYMO .....	144
Figura 4.5 – Menús de configuración de algunos de los sistemas del vehículo.....	145
Figura 4.6 – Maniquí articulado, ejemplo de segmentación del cuerpo humano en elipsoides .....	146
Figura 4.7 – Ejemplo de división del cuerpo en distintos segmentos .....	147
Figura 4.8 – Modelo humano de 1,75 m. y 75 kg. creado con GEBOD, implementado en el programa ATB3I de General Dynamics .....	149
Figura 4.9 – Modelo multicuerpo de peatón de PC-CRASH .....	149
Figura 4.10 – Menú de configuración de los sistemas multicuerpo .....	150
Figura 4.11 – Detalle de las opciones de configuración de las uniones entre cuerpos	151
Figura 4.12 – Ejemplo de modificación de la postura del peatón a través del menú de multicuerpos.....	152
Figura 5.1 – Menú de opciones de PC-CRASH .....	155
Figura 5.2 – Menú de control de la simulación .....	157
Figura 5.3 – Barra de simulación .....	157
Figura 5.4 – Ejemplo de la geometría por defecto de los vehículos. A la izquierda, Toyota Land Cruiser; a la derecha, Fiat Cinquecento. ....	161
Figura 5.5 – Vista lateral acotada del SUV (Sport Utility Vehicle) empleado en las simulaciones.....	162
Figura 5.6 – Proceso de toma de medidas sobre la vista lateral de un vehículo, realizado con AutoCAD .....	163
Figura 5.7 – Introducción manual de las dimensiones del vehículo en PC-CRASH .....	163
Figura 5.8 – Comparativa entre la geometría por defecto (a la izquierda) y la geometría modificada (a la derecha) de uno de los vehículos utilizados en las simulaciones .....	164
Figura 5.9 – Citroën C4 real y el modelo considerado en las simulaciones .....	164
Figura 5.10 – Renault Grand Espace real y el modelo considerado en las simulaciones .....	165
Figura 5.11 – Bmw X3 real y el modelo considerado en las simulaciones.....	165
Figura 5.12 – Mercedes SLR real y el modelo considerado en las simulaciones .....	165
Figura 5.13 – Fiat Ducato real y el modelo considerado en las simulaciones .....	166
Figura 5.14 – Iveco EuroCargo real y el modelo considerado en las simulaciones....	166
Figura 5.15 – Ejemplo de la situación inicial del peatón en las simulaciones .....	168
Figura 5.16 – Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory).....	169

Figura 5.17 – Proyección hacia delante (forward projection) .....	169
Figura 5.18 – Volteo sobre la aleta (fender vault).....	169
Figura 5.19 – Volteo sobre el techo (roof vault) .....	169
Figura 5.20 – Salto mortal (somersault) .....	169
Figura 5.21 – Configuración de la secuencia de frenada utilizada en las simulaciones .....	171
Figura 5.22 – Localización del centro de masas del modelo de peatón .....	174
Figura 5.23 – Secuencia de atropello en la Configuración 2 a 50 km/h, para el turismo medio .....	175
Figura 5.24 – Secuencia de atropello en la Configuración 4 a 50 km/h, para el monovolumen.....	178
Figura 5.25 – Secuencia de atropello en la Configuración 4 a 40 km/h, para el SUV .	181
Figura 5.26 – Secuencia de atropello en la Configuración 7 a 50 km/h, para el deportivo.....	183
Figura 5.27 – Secuencia de atropello en la Configuración 4 a 50 km/h, para el furgón comercial.....	185
Figura 5.28 – Secuencia de atropello en la Configuración 4 a 50 km/h, para el deportivo.....	187
Figura 5.29 – Comparativa de la geometría lateral de los seis modelos de vehículos empleados en las simulaciones.....	194

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 INTRODUCCIÓN

La historia de los accidentes de tráfico se remonta posiblemente incluso antes de que se inventase la palabra tráfico, cuando por las sendas y caminos ya se empleaban carruajes de todo tipo, tirados por animales. En aquellos tiempos tan lejanos ya debía haber choques entre los carruajes, o caminantes arrollados por estos. Los beneficios que trajo consigo el desarrollo de los medios de transporte terrestre desde la antigüedad, también vinieron acompañados de los accidentes. Todo este desarrollo en el transporte se fue alimentando poco a poco del desarrollo intelectual e industrial de la sociedad hasta que hace más de un siglo los primeros automóviles vieron la luz. Hasta ese momento, y también a partir de entonces, los accidentes han sido consecuencia, tal vez, del alto precio que había que pagar por conseguir avanzar en el desarrollo de los vehículos. Sin embargo, a la vez que los vehículos iban avanzando, haciéndose más fiables, rápidos y potentes, también se buscaban que fuesen los más seguros posibles. Aunque también es cierto que casi siempre las medidas de seguridad han ido por detrás del resto de avances del automóvil. Desde hace algunas décadas se comprendió que la seguridad en el automóvil era algo tan importante o más que el desarrollar motores más potentes y eficientes, y se comenzó la investigación en diferentes frentes, todos relacionados con la Seguridad Vial.

El concepto de Seguridad Vial es tan amplio que puede abarcar desde las medidas adoptadas en los vehículos, hasta las medidas de seguridad y mejora en las diferentes vías, pasando por la educación o el desarrollo de normas de circulación. Cuando se tratan los accidentes de circulación como uno de los problemas que debe abordar la Seguridad Vial, a veces se centra la atención en aquellos en los que se ven implicados diferentes vehículos, cuyas consecuencias suelen ser dramáticas al producirse un número muy importante de víctimas. Sin embargo, no se pueden olvidar los accidentes de circulación que afectan a los usuarios más vulnerables de las vías, como son los ciclistas y peatones. Cada año en todo el mundo decenas de miles de personas se ven implicadas en atropellos, resultando heridas de diferente consideración o falleciendo. Actualmente miles de peatones mueren atropellados en las distintas calles y carreteras europeas todos los años, suponiendo alrededor del 15% del total de fallecidos en accidentes de circulación (*Barrios*).

A pesar de ser una cifra muy elevada desde hace años se viene reduciendo gracias al esfuerzo conjunto de toda la sociedad que, consciente del grave problema en particular que suponen los atropellos, y los accidentes de tráfico en general, está trabajando en distintos ámbitos para lograr una progresión descendente de los afectados en accidentes viales. La labor de reducir la cifra de víctimas de atropellos está siendo llevada a cabo por diferentes entidades y colectivos, que se centran en una tarea determinada. Así por ejemplo, los Gobiernos centran sus esfuerzos en nuevas normativas sobre tráfico, la educación y la concienciación social, o la mejora continua de las infraestructuras viales. Las Universidades y otros centros de investigación realizan constantemente estudios para comprender mejor todos los aspectos relacionados con los atropellos, con el objetivo de desarrollar distintas medidas que contribuyan a minimizar el número de accidentes y la gravedad de los peatones afectados. Los fabricantes de vehículos desde hace años son conscientes de esta tendencia social por la preocupación en la seguridad, y han comenzado a desarrollar medidas destinadas exclusivamente a la protección del peatón en caso de atropello.

Con este Proyecto Fin de Carrera se pretende abordar el tema de los atropellos de peatones desde diferentes puntos de vista, tratando la situación actual en cuanto a cifras y estadísticas, la normativa existente, las medidas de prevención y protección de atropellos, además de los distintos tipos de ensayos de atropello que pueden llevarse a cabo. En la mayoría de estos aspectos la informática se ha convertido en una herramienta de trabajo indispensable, con la cual poder tratar cada uno de los temas relacionados con los atropellos de peatones de una forma más eficaz y eficiente. De esta forma, la simulación por ordenador se emplea cada vez más en la investigación y el estudio del atropello como un suceso altamente complejo, o en el desarrollo de nuevas medidas de protección en caso de atropello. Y en general, la simulación se emplea en cualquier situación como apoyo a la investigación, siendo un recurso utilizado como medida de ahorro de coste y de tiempo. Por todo esto, además de tratar los atropellos de peatones de forma descriptiva, también se han realizado una serie de simulaciones hechas por ordenador, en la que se reproduce el atropello de un peatón, modificando las condiciones del suceso como son, el vehículo implicado, su velocidad o la posición del peatón en el momento de la colisión. Con estas simulaciones se pretende dar a conocer de una forma visual y aproximada, lo que ocurre durante, y tras un atropello, además de recoger el daño relativo que sufre un peatón en función del vehículo involucrado en el atropello. El programa elegido para realizar las simulaciones es PC-CRASH v.8, empleado en la reconstrucción e investigación de accidentes de tráfico.



## 1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

Los objetivos que se pretenden cumplir con el presente Proyecto Fin de Carrera son los siguientes:

- ♦ Tratar de forma breve algunos de los aspectos más importantes del atropello de peatones como son las estadísticas de los últimos años, las lesiones más comunes que provocan o las causas más frecuentes de este tipo de accidentes. Además, indicar y describir los distintos tipos de accidentes que se pueden dar, así como las diferentes fases en las que puede dividirse un atropello. Por último, describir algunas de las medidas de seguridad actuales que existen para prevenir los atropellos, o proteger al peatón en caso de que se produzcan.
- ♦ Realizar un repaso del estado del arte de los ensayos de atropello, indicando la normativa existente actual, los distintos métodos de ensayo empleados, así como los diferentes elementos utilizados en los mismos.
- ♦ Utilizando un programa de simulación por ordenador, realizar una serie de simulaciones de diferentes atropellos, con las cuales poder evaluar la influencia de diferentes factores en los resultados del atropello. En concreto, se pretende conocer por un lado, si la geometría frontal y la velocidad del vehículo están relacionadas con la tipología de atropello que puede darse, y por otro, la correlación que existe entre el daño relativo producido en las distintas partes del cuerpo del peatón y la geometría del vehículo.

## 1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El Proyecto está estructurado en diversos capítulos y varios anexos, que son descritos a continuación:

En el Capítulo 1 se realiza una breve introducción al Proyecto, además de indicar los principales objetivos que se plantean alcanzar con el mismo.

En el Capítulo 2 se trata el atropello de un peatón de forma general incluyendo información de diferentes aspectos relacionados con este tipo de accidente, como son: las estadísticas y datos más recientes, las lesiones más comunes observadas, o las fases, las tipologías y las causas de un atropello. Por último se indican algunas de las medidas que pueden adoptarse para la prevención de los atropellos y mejorar la protección para los peatones.

El Capítulo 3 está dedicado a los ensayos de atropello, en el que se indican los distintos tipos de pruebas que se llevan a cabo, en función de la finalidad del ensayo o los elementos empleados. También se detallan las normas que rigen estas pruebas, así como los elementos utilizados en los ensayos, según estén basados en subsistemas o en sistemas completos, de tamaño real. Por último, se hace un pequeño repaso de los diferentes programas de simulación utilizados en los ensayos de atropello, mencionando y describiendo alguno de los más empleados.

En el Capítulo 4 se trata la simulación de un atropello desde los diferentes aspectos que han de considerarse cuando se realiza una simulación, destacando sobre todo la modelización de los elementos que intervienen en ésta. Además se realiza la descripción de las principales características, usadas en las simulaciones, del programa PC-CRASH.

El Capítulo 5 está dedicado a la parte experimental de este Proyecto, consistente en la simulación de diferentes atropellos. Se explican los pasos previos seguidos en la preparación de las simulaciones, y se detalla la finalidad que tienen los dos bloques de simulaciones realizados. Para cada uno de esos dos bloques se especifica el proceso de preparación seguido, así como las variables tenidas en cuenta en cada caso, seguidos del análisis de los resultados y las conclusiones extraídas.

En el Capítulo 6 se expresan las conclusiones generales obtenidas de la realización de este Proyecto Fin de Carrera junto con la propuesta de posibles trabajos futuros.

El Capítulo 7 muestra la bibliografía y fuentes de información consultadas durante la realización de este Proyecto.

En último lugar se incluye un Anexo donde aparecen todas las tablas de resultados obtenidas durante la parte experimental del Proyecto, así como el contenido de los discos de datos que se adjuntan con esta memoria.

## **2. INFORMACIÓN GENERAL SOBRE LOS ATROPELLOS**

### **2.1 INTRODUCCIÓN**

En la actualidad cuando se trata el tema de la Seguridad Vial, y en concreto, de los accidentes de tráfico, en la mayoría de los casos se piensa únicamente en aquellos en los que se produce una colisión entre varios vehículos. Este hecho tiene cierta lógica ya que son accidentes muy numerosos y cuyas consecuencias son más dramáticas, al producir un gran número de heridos y de víctimas mortales todos los años. Sin embargo, existen otros accidentes de tráfico que no deben olvidarse ya que en la mayoría de las ocasiones causan heridos de gravedad y fallecidos. Estos accidentes son los atropellos de peatones, que en 2006 en España produjeron 11766 víctimas entre heridos leves, graves y fallecidos, es decir, más de 32 víctimas diarias [1]. Este dato pone de manifiesto el gran problema que suponen los atropellos, que están vinculados en la mayoría de las ocasiones al tráfico urbano. Los datos en la ciudad de Madrid, indican que una de cada tres víctimas mortales es consecuencia de un atropello[2]. A pesar de esto, como se verá más adelante, el número de víctimas atropelladas en carretera, fuera de los núcleos urbanos, no puede ser despreciado.

Desde que los peatones han tenido que compartir un mismo espacio por el que transitar con vehículos a motor o de otro tipo, han existido los atropellos. Cuando aún no existían los vehículos a motor, los peatones sufrían atropellos o colisiones con ciclistas o con carruajes tirados por animales. Posteriormente aparecieron los vehículos a motor, hace ya más de un siglo, lo que implicaba que las ciudades y caminos eran compartidos por un número aún mayor de usuarios. Las normas de circulación y la separación física y señalización de las distintas zonas de la vía, y de la ciudad, ayudaron a que esta convivencia permanente entre personas y vehículos fuese lo menos accidentada posible. Aún así, es inevitable que peatones y vehículos compartan ciertos espacios comunes, siendo en estos, en la mayoría de los casos, donde se producen los atropellos, como son los pasos de peatón o zonas cercanas a intersecciones.

Con motivo del Día Mundial de la Salud del año 2004, que en ese año estaba dedicado a la Seguridad Vial, la Organización Mundial de la Salud (OMS) publicó un folleto sobre el acontecimiento [3]. En él se cita la siguiente historia:

***La primera muerte por accidente de tráfico en el mundo***

El 17 de agosto de 1896, Bridget Driscoll, una mujer de 44 años, madre de dos hijos, se convirtió en la primera víctima mortal de un accidente de tráfico. Ella y su hija adolescente iban de camino a un espectáculo de baile en el Crystal Palace de Londres, cuando Bridget fue arrollada por un coche al atravesar los jardines del palacio. El coche iba «a gran velocidad» afirmó un testigo. Posiblemente fuera a 12,8 km/h, cuando no debía ir a más de 6,4 km/h.

El conductor era un joven que ofrecía paseos en coche para mostrar el nuevo invento, y, según algunos testigos, estaba tratando de impresionar a una joven pasajera. En la investigación, el funcionario encargado afirmó: «Esto no debe volver a ocurrir nunca más».

Por desgracia la afirmación del funcionario no se cumplió y los accidentes de tráfico, y en particular los atropellos de peatones, se han repetido año tras año, alcanzando cifras muy preocupantes. Por esto, especialmente desde hace algunos años, el trabajo de todas las administraciones públicas y otros organismos de todo el mundo, está orientado hacia la disminución de la siniestralidad vial. El resultado de este esfuerzo global es que cada año se consigan reducir las cifras de accidentes y víctimas, manteniéndose una tendencia descendente.

En este Capítulo 2 se trata el atropello desde diferentes puntos de vista, describiendo los tipos, las causas y las consecuencias de los atropellos, destacando las principales estadísticas sobre estos accidentes. Además se indican algunas de las medidas adoptadas para minimizar el número de atropellos y la gravedad de las lesiones de los peatones involucrados.

## 2.2 ESTADÍSTICAS DE ATROPELLOS

### 2.2.1 Situación en el Mundo

Una buena base de datos para tener una visión general de las cifras de atropellos en el mundo puede ser la IRTAD (International Road Traffic and Accident Database), gestionada por IRTAD Group. Se trata de un organismo vinculado a la OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development), cuyo objetivo principal es proporcionar una base de datos agregados sobre los accidentes y víctimas de accidentes de tráfico de los países miembros, con la cual poder trabajar con el objetivo global de reducir el número de víctimas en accidentes de tráfico[4].

En 1988 el Programa de Investigación de Transporte por Carretera de la OECD crea la IRTAD (International Road Traffic and Accident Database). En 2004, el European Conference of Ministers of Transport (ECMT) y la OECD unen su capacidad en investigación y se crea el Joint Transport Research Centre, cuya actividad se centra en la investigación cooperativa sobre los distintos modos de transporte terrestre para apoyar a los distintos países miembros en sus políticas de transporte. En 2006, el Consejo de Ministros acordó transformar el ECMT, en el International Transport Forum(similar al Joint Transport Research Centre, JTRC), para de esta forma incluir un mayor número de países miembros.

Desde Enero de 2004 el JTRC es el responsable de la gestión de la IRTAD, y más concretamente el grupo de trabajo asociado a este organismo, el International Traffic Safety Data and Analysis Group.

Los objetivos de IRTAD pueden resumirse en los siguientes seis puntos:

- ◆ Cooperación científica e intercambio de información y conocimientos técnicos entre la red internacional de investigadores de seguridad y estadísticos.
- ◆ Recogida, armonización y difusión de información oportuna y global de accidentes, así como la exposición de los datos.
- ◆ Enfoque científico para avanzar en el conocimiento de los accidentes basado en métodos estadísticos de análisis de accidentes de circulación.
- ◆ La mejora de los datos utilizados para la investigación y de las políticas de planificación.
- ◆ Estimular el debate internacional sobre la armonización de las definiciones.
- ◆ El uso de los datos y conclusiones para identificar las características especiales donde la investigación avanzada puede liderar las mejoras en seguridad vial.

A pesar de que en esta base de datos no se recogen estadísticas de todo el mundo, los veintiocho países representados pueden ser una buena referencia para poder

extrapolar las cifras a escala global. Cada uno de los países miembros de IRTAD Group está representado por una o varias entidades, públicas o privadas, relacionadas con la seguridad vial. A continuación se incluye la lista de los países miembros, así como las entidades involucradas en IRTAD.

<b>País</b>	<b>Entidad</b>
Alemania	BAST • ADAC • Bosch • DaimlerChrysler • DEKRA • DVR • Unfallforschung der Versicherer GDV • Volkswagen
Australia	Department of Infrastructure, Transport, Regional Development & Local, Government • University of Queensland (CONROD)
Austria	Kuratorium für Verkehrssicherheit (KfV)
Bélgica	Belgian Road Safety Institute • Nissan Motor Manufacturing (UK) Ltd.
Canada	Transport Canada
Dinamarca	Road Directorate • Danish Transport Research Institute (DTU) • Aalborg University
Eslovenia	Directorate for Roads (DRSC)
España	Dirección General de Tráfico • RACC • Universidad de Valencia
Estados Unidos	NHTSA • University of Michigan
Finlandia	Finnish Road Administration (FinnRA)
Francia	S.E.T.R.A. • INRETS • PSA Peugeot Citroën • Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière
Gran Bretaña	Department for Transport • FORD
Hungría	Institute for Transport Sciences (KTI)
Irlanda	Road Safety Authority
Islandia	Icelandic Road Administration
Israel	National Road Safety Authority • Or Yarok Association
Japón	National Police Agency • ITARDA • National Research Institute for Police Science
Jordania	Jordan Traffic Institute
Korea	Road Traffic Authority (ROTA) • KOTSA
Malasia	Malaysian Institute of Road Safety Research (MIROS)
Noruega	Norwegian Public Roads Administration
Nueva Zelanda	Ministry of Transport
Países Bajos	Ministerie van Verkeer en Waterstaat • SWOV
Polonia	Motor Transport Institute (ITS)
República Checa	Republic Transport Research Centre (CDV)
Serbia	University of Belgrade
Suecia	National Road Administration • VTI
Suiza	Swiss Council for Accident Prevention (bfu)
Organizaciones Internacionales	European Commission (DGTREN) • European Automobile Manufacturers Association (ACEA) • FIA Foundation for the Automobile and Society • The Motorcycle Industry in Europe (ACEM)

**Tabla 2.1 - Países y entidades integrantes de IRTAD (International Road Traffic and Accident Database)**

De la base de datos se exponen las cifras más significativas según el tipo de víctimas, ya sean peatones, ciclistas, ocupantes de motocicletas, turismos o furgonetas. Además se muestran los datos de diferentes años, para poder ver la evolución a lo largo del tiempo y poder observar la tendencia predominante.

En el caso concreto de los datos referidos a los atropellos de peatones, IRTAD actualmente tiene publicado el número de víctimas mortales en los países miembros distribuidos en tres años: 1980, 2005 y 2006. Cada país sigue un criterio distinto para computar las víctimas mortales, así por ejemplo en el caso de España, se consideran víctimas mortales aquellas que fallecen en los 30 días siguientes al accidente(hasta 1993 el plazo de tiempo para el cómputo eran 24 horas). En cualquier caso, con los siguientes datos se pretende dar una visión global del número de atropellos en el mundo, sin profundizar en exceso en las causas, entorno o tipo de víctimas del atropello. En un próximo punto de este mismo capítulo se tratan las estadísticas de atropellos en España con un mayor detalle para poder obtener mejores conclusiones.

A continuación se muestra la tabla de los atropellos mortales obtenida de IRTAD [4]:

<b>País</b>	<b>1980</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>Δ% 1980-2006</b>	<b>Δ% 2005-2006</b>
Alemania	3720	686	711	-80,89	3,64
Australia	644	225	227	-64,75	0,89
Austria	459	97	110	-76,03	13,40
Bélgica	507	108	122	-75,94	12,96
Canadá	817	345	-	-	-
Dinamarca	138	44	60	-56,52	36,36
Eslovenia	-	37	36	-	-2,70
España	1513	680	613	-59,48	-9,85
Estados Unidos	8070	4881	4784	-40,72	-1,99
Finlandia	139	45	49	-64,75	8,89
Francia	2378	635	535	-77,50	-15,75
Gran Bretaña	1941	671	675	-65,22	0,60
Grecia	451	234	267	-40,80	14,10
Países Bajos	295	83	66	-77,63	-20,48
Hungría	642	289	296	-53,89	2,42
Irlanda	208	74	-	-	-
Islandia	9	1	4	-55,56	300,00
Israel	-	134	139	-	3,73
Italia	1957	-	-	-	-
Japón	3597	2442	2363	-34,31	-3,24
Korea	4225	2548	2442	-42,20	-4,16
Luxemburgo	31	2	-	-	-
Noruega	71	31	35	-50,70	12,90
Nueva Zelanda	98	31	44	-55,10	41,94
Polonia	2832	1756	1802	-36,37	2,62
Portugal	-	214	156	-	-27,10
Rep. Checa	534	298	202	-62,17	-32,21
Suecia	133	50	55	-58,65	10,00
Suiza	254	69	76	-70,08	10,14

**Tabla 2.2 – Distribución de los peatones fallecidos en los últimos años en los países miembros de IRTAD**

Como se puede ver, los datos muestran que desde la década de los años ochenta ha habido una gran reducción en el número de muertes en todos los países representativos del mundo y miembros de IRTAD Group. Esta gran reducción, cercana al 60%, indica que todos los países en conjunto tomaron conciencia del grave problema que suponían los accidentes de tráfico, y que implantaron medidas para reducirlos. Como consecuencia de esta nueva mentalidad global, la mayor



preocupación por la seguridad de los automóviles y también los avances tecnológicos en los vehículos, se ha conseguido que el número de peatones fallecidos se reduzca. Sin embargo, al considerar la columna de la diferencia porcentual entre el año 2005 y 2006, ya no es posible destacar una tendencia clara, puesto que existen tanto grandes descensos como elevados aumentos en el número de muertes. Estas cifras relativas entre dos años consecutivos son importantes para las políticas de cada país, ya que a partir de ellas pueden extraer conclusiones sobre las medidas a mejorar o conservar. Por el contrario, no es posible obtener una conclusión clara cuando se analizan en conjunto los datos de todos los países. Este comportamiento de los datos lleva a pensar que cuando se trata de analizar este tipo de estadísticas, intentando encontrar alguna tendencia clara es necesario emplear para ello un periodo de tiempo de varios años, para minimizar la influencia de los datos atípicos que pueden producirse en un año en concreto debido a diferentes factores.

## 2.2.2 Situación en Europa

A pesar de que en el apartado anterior, dedicado al número de fallecidos en atropellos en el mundo, aparecían los datos de los principales países europeos, para tratar las cifras en Europa se ha considerado un reciente estudio publicado, referente al número de muertes en los pasos de peatones. Este estudio, fechado en Enero de 2008, se ha realizado gracias a la financiación de la Fundación FIA y ha sido dirigido por los principales automóvil clubes europeos, dentro del marco de EuroTest y bajo el liderazgo del Automóvil Club Suizo. En este estudio se trata no sólo el riesgo de los pasos de peatones, incluyendo datos sobre fallecidos, sino que se analizan los reglamentos y directrices existentes en Europa sobre los pasos de peatones, así como sus diseños y equipamientos. [5].

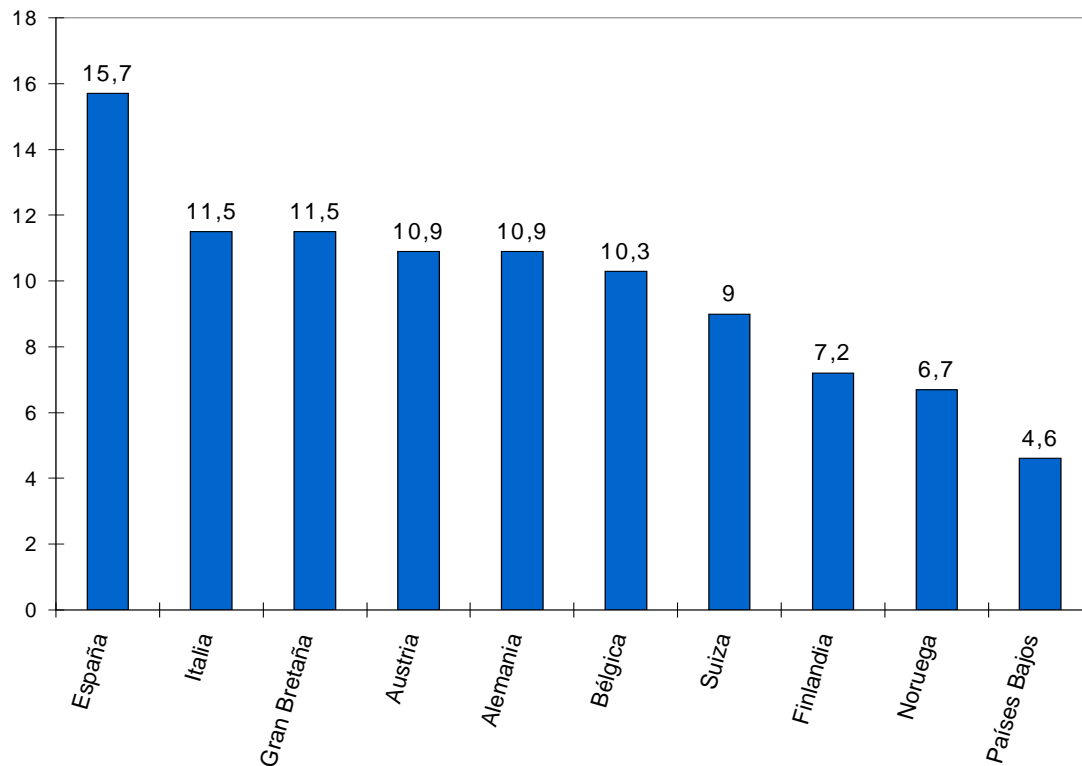
A continuación se incluyen los diez automóvil clubes, indicando el país al que representan:

- |                     |                       |
|---------------------|-----------------------|
| ♦ ÖAMTC (Austria)   | ♦ ACI (Italia)        |
| ♦ TCB (Bélgica)     | ♦ ANWB (Países Bajos) |
| ♦ AL (Finlandia)    | ♦ NAF (Noruega)       |
| ♦ ADAC (Alemania)   | ♦ RACE (España)       |
| ♦ AA (Gran Bretaña) | ♦ TCS (Suiza)         |

Aunque el estudio incluye únicamente los datos de diez países, se ha utilizado por ser un estudio de reciente publicación y porque se realiza una interesante diferenciación de los accidentes ocurridos dentro y fuera de los pasos de peatones.

Los datos recogidos en el estudio pueden recopilarse en tres simples gráficos que se presentan a continuación. En el primero, se indica el número total de peatones

fallecidos por cada millón de habitantes durante el año 2005 [3][4]. Para poder tener una idea más clara sobre la importancia de esa cifra se ha calculado también el número total de fallecidos, empleando para ello el número de habitantes de cada país recogido en la base de datos de IRTAD.

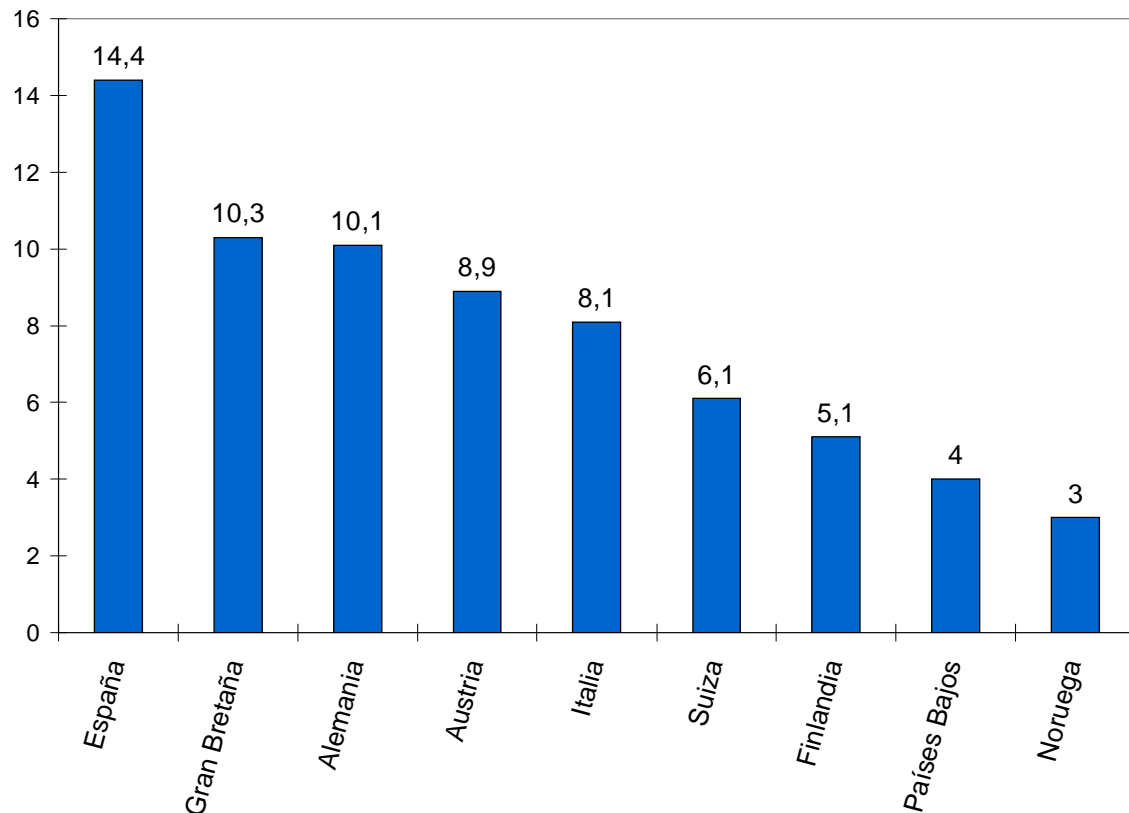


**Gráfico 2.1 - Número de fallecidos en atropello por millón de habitantes en algunos países europeos (Año 2005)**

País	Nº Fallecidos	País	Nº Fallecidos
España	691	Bélgica	108
Italia	666	Suiza	67
Gran Bretaña	677	Finlandia	38
Austria	90	Noruega	31
Alemania	899	Países Bajos	75

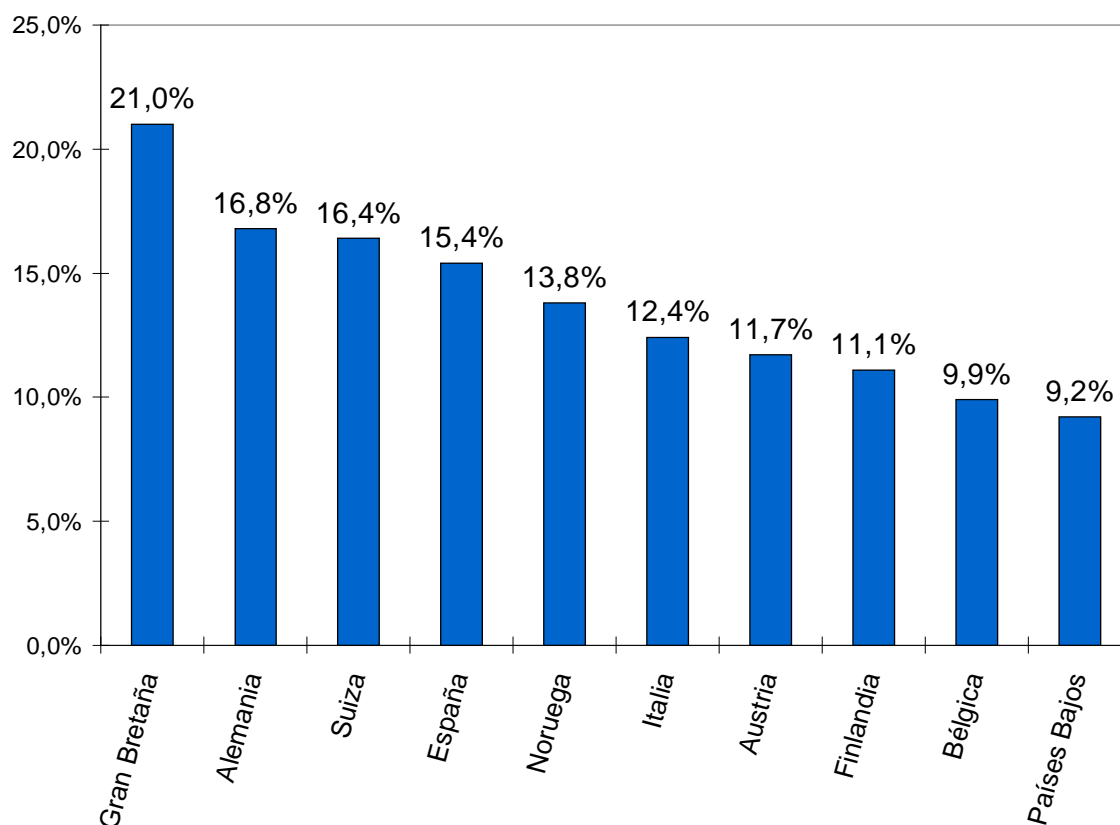
**Tabla 2.3 - Número total de fallecidos en atropellos (Año 2005)**

En el segundo gráfico se muestra el número de peatones fallecidos atropellados fuera de los pasos de peatones.



**Gráfico 2.2 – Número de fallecidos, por millón de habitantes, atropellados fuera de los pasos de peatones**

Y por último, se puede destacar un tercer gráfico en el que se muestra la cifra relativa entre las muertes causadas por atropello y el número total de muertes debidas a los accidentes de tráfico.



**Gráfico 2.3 – Porcentaje de víctimas mortales en atropellos respecto al número total de fallecidos en accidentes de tráfico (Año 2005)**

De los datos anteriores se pueden extraer varias conclusiones:

- ♦ De los diez países analizados, España destaca por tener la cifra de muertes mayor debidas a atropellos por cada millón de habitantes, siendo la diferencia de 4,2 respecto al segundo país, Italia.
- ♦ Las cifras de muertes provocadas por atropello al año, refleja que en los países con mayor número de fallecidos el promedio diario es de casi 2, como es el caso de España, o 2.5 en Alemania.
- ♦ España también destaca por ser el país donde muere un mayor número de personas fuera de los pasos de peatones. De las 691 muertes, 633 murieron fuera de los pasos señalizados para peatones. Aunque como puede verse, ésta es una tendencia compartida por todos los países analizados. En Alemania el 93% de los peatones fallecen fuera de los pasos de peatones, frente al 92 % en España, mientras que en Gran Bretaña esta cifra se sitúa en el 90%. Únicamente Noruega posee una cifra menor al 50%, siendo del 45%.
- ♦ El porcentaje de víctimas mortales como consecuencia de atropellos respecto al número total de muertos en accidentes de tráfico es considerablemente alto, siendo de alrededor del 15% en toda Europa (*Barrios*). En el caso de los diez países analizados se sitúa en el 13,77%. Entre estos países destaca Gran Bretaña donde prácticamente uno de cada cinco muertes en accidentes de tráfico son peatones atropellados.

### 2.2.3 Situación en España

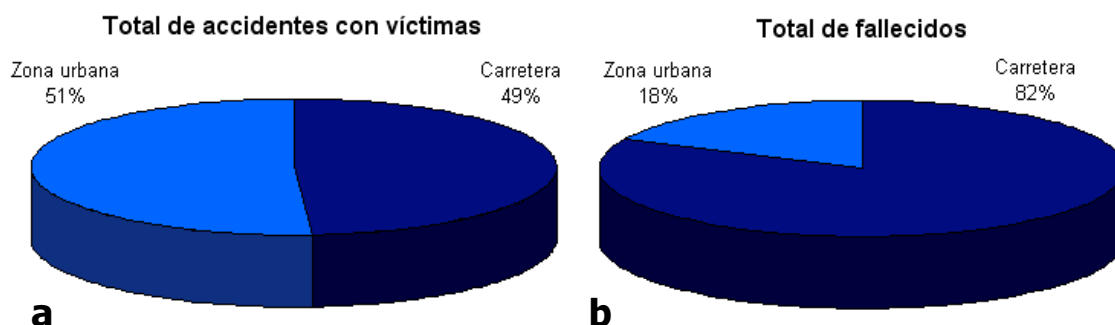
En este apartado dedicado a España se pueden ver con más detalle diferentes estadísticas, donde es posible conocer las circunstancias en las que se producen los accidentes, distinguiendo por ejemplo, los atropellos en función de la gravedad de las heridas, de la zona donde se produce, la edad de los peatones, etc. La mayoría de los datos han sido recabados de los diferentes informes publicados por la Dirección General de Tráfico (DGT)[6].

Según los datos recogidos en el último "Informe Anual de Siniestralidad 2007", publicado en Enero de 2008, durante ese año murieron en las carreteras españolas un total de 242 peatones, 43 menos que en el año 2006, y 156 menos que en 2003. Esta cifra supone un 9.45% del total de fallecidos en carretera[7]. Estas cifras pueden verse en el siguiente cuadro resumen:

<b>Víctimas mortales</b>	<b>2003</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>Dif. 07/06</b>	<b>Dif. 07/03</b>	<b>Δ% 07/06</b>	<b>Δ% 07/03</b>
Atropello a peatón	398	285	242	-43	-156	-15.10	-39.20

**Tabla 2.4 – Evolución de los peatones atropellados fallecidos en las carreteras españolas durante los últimos años**

Aunque son cifras significativas, únicamente están incluidas las víctimas de atropello producidas en carretera. A pesar de que en carretera se produce el 82% de los muertos [8](en el año 2006), es en ciudad donde se produce la mayoría de los accidentes con víctimas. En concreto, durante el 2006 supusieron el 51% de los accidentes. Por tanto es preciso tener en cuenta el número de atropellos producidos en zona urbana, no sólo porque hay un mayor número de accidentes, sino porque el atropello puede considerarse un accidente típicamente urbano.



**Gráfico 2.4 – Distribución de accidentes en carretera y zona urbana (Año 2006). a) Total de accidentes con víctimas. b) Total de fallecidos**

Considerando los datos desglosados del año 2006, se puede conocer los peatones atropellados fallecidos tanto en carretera como en zona urbana.

<b>Fallecidos en Carretera</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>Distribución % 2006</b>	<b>Δ% 06/05</b>	<b>Δ% 06/03</b>
Salida de la vía	1707	1466	1386	1191	35	-14	-30
Colisión frontal	843	693	688	618	18	-10	-27
Colisión lateral y frontolateral	907	826	745	560	17	-25	-38
Colisión trasera múltiple	364	303	284	332	10	17	-9
<b>Atropello peatón</b>	<b>407</b>	<b>319</b>	<b>334</b>	<b>284</b>	<b>8</b>	<b>-15</b>	<b>-30</b>
Vuelco	71	70	46	57	2	24	-20
Otro tipo	181	164	169	325	10	92	80
<b>Total</b>	<b>4480</b>	<b>3841</b>	<b>3652</b>	<b>3367</b>	<b>100</b>	<b>-8</b>	<b>-25</b>

Tabla 2.5 – Distribución de los fallecidos en carretera en España, en función del tipo de accidente

Es posible destacar que los atropellos producidos en carretera provocan el 8% de los muertos totales, muy por encima, por ejemplo, de los muertos asociados a vuelcos. También puede verse como esta cifra ha disminuido un 15% respecto al año precedente, 2005.

<b>Fallecidos en Zona Urbana</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>Distribución % 2006</b>	<b>Δ% 06/05</b>	<b>Δ% 06/03</b>
Salida de la vía	146	158	123	108	18	-12	-26
Colisión frontal	52	51	45	40	5	-11	-23
Colisión lateral y frontolateral	225	228	183	163	22	-11	-28
Colisión trasera múltiple	40	37	42	38	5	-10	-5
<b>Atropello peatón</b>	<b>360</b>	<b>333</b>	<b>326</b>	<b>281</b>	<b>38</b>	<b>-14</b>	<b>-22</b>
Vuelco	11	20	20	19	3	-5	73
Otro tipo	85	73	51	88	12	73	4
<b>Total</b>	<b>919</b>	<b>900</b>	<b>790</b>	<b>737</b>	<b>100</b>	<b>-7</b>	<b>-20</b>

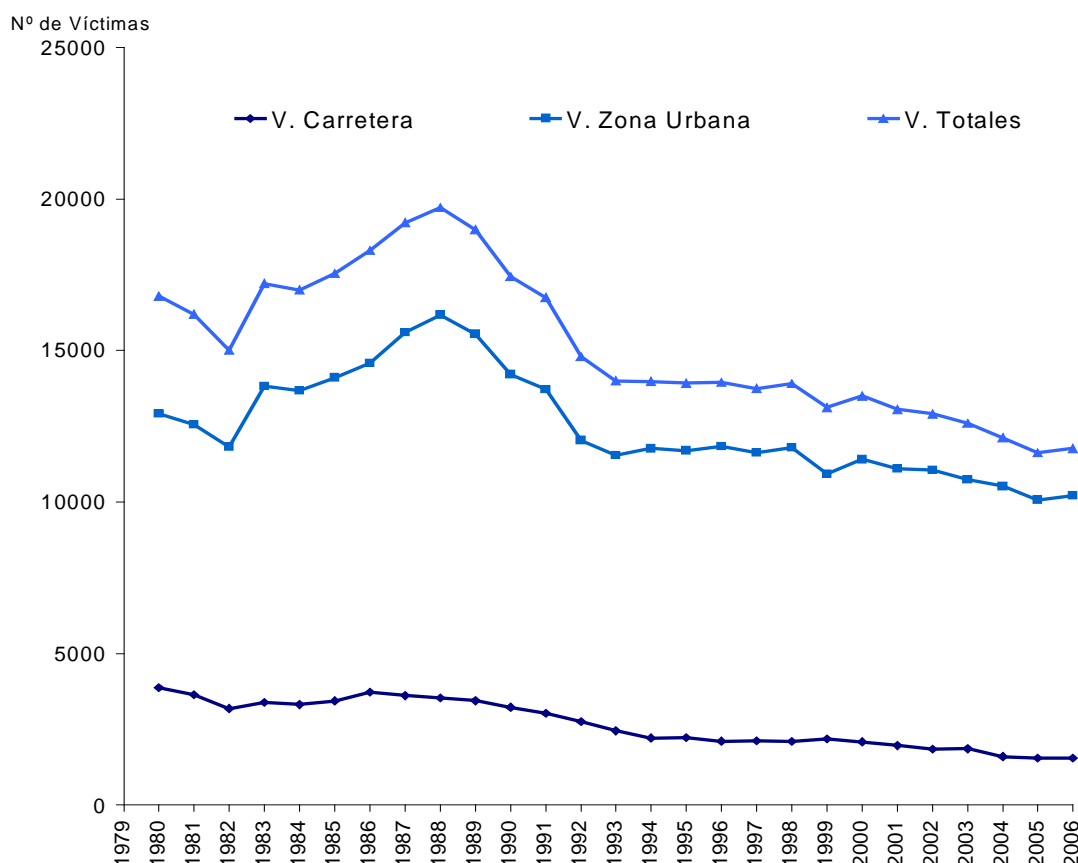
Tabla 2.6 – Distribución de los fallecidos en zona urbana en España, en función del tipo de accidente

En el caso de los atropellos en zona urbana, al tratarse de un accidente típicamente urbano, destacan por encima del resto con el 38% de los muertos, con un total de 281 fallecidos.

Según los informes o estudios consultados se aprecian ligeras diferencias en algunas cifras, debidas posiblemente a criterios de cálculos diferentes, actualización de datos u otras causas desconocidas.

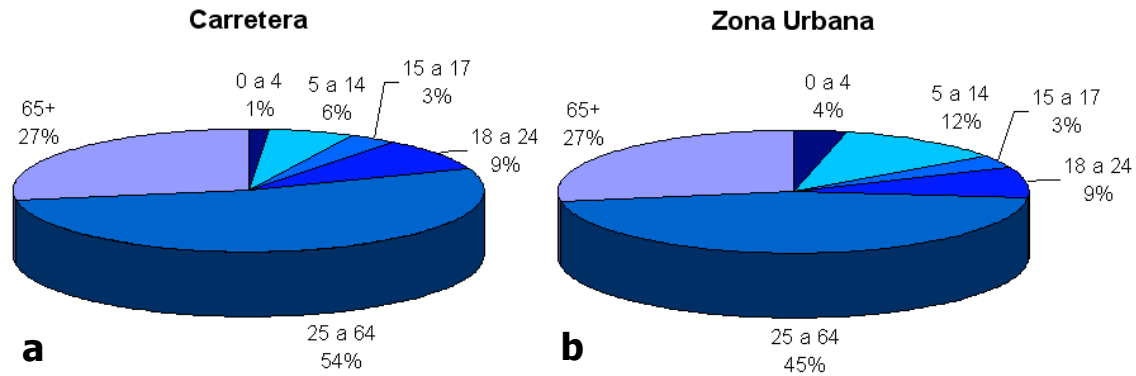
Otra estadística a destacar es la evolución que ha sufrido el número total de peatones involucrados en accidentes, contabilizando tanto los heridos, leves o graves, como fallecidos. En Gráfico 2.5 se realiza la distinción de las víctimas producidas en carretera o zona urbana [1].

En primer lugar se puede destacar que la cifra de víctimas en zona urbana, como era de esperar, es muy superior a las víctimas producidas en carretera. Y en segundo lugar se puede apreciar una clara tendencia a que el número de víctimas en accidentes viales se reduzca, desde hace aproximadamente dos décadas.



**Gráfico 2.5 - Evolución de las víctimas de atropello en España durante los últimos años**

Otra de las clasificaciones que pueden realizarse de los atropellos producidos en España es por la edad de los peatones víctimas [1][9]. Existen datos desde 1980 hasta 2006 de las víctimas de atropellos diferenciando las producidas en carretera y en zona urbana, así como separadas por tramos de edad. Tras haber comparado los resultados relativos de varios años, 1995, 2000, 2004 y 2006, se observa que aunque existen pequeñas variaciones, los valores se mantienen con diferencias de pocos puntos porcentuales de un año a otro. Por este motivo se exponen los valores del último año del que se tienen datos, 2006, y que corresponde con el año en el que se produjeron un menor número de víctimas.



**Gráfico 2.6 – Distribución de los peatones víctimas de atropello según su edad en España (Año 2006). a) En carretera. b) En zona urbana**

El último dato destacable es el del tipo de accidente en el que un peatón se ve involucrado. Se pueden distinguir hasta seis categorías de atropellos en función de la actividad que realiza el peatón y de sus circunstancias. De nuevo, también es posible distinguir entre los accidentes producidos en carretera o zona urbana [9].

Condición de las víctimas	Víctimas	Muertos	Heridos Leves	Heridos Graves	Total Heridos
Peatón sosteniendo bicicleta	32	8	15	9	24
Peatón reparando vehículo	19	5	2	12	14
Peatón aislado o en grupo	1368	303	569	496	1065
Conductor de animales	11	0	5	6	11
Otros	173	24	93	56	149

**Tabla 2.7 – Distribución de las víctimas de atropello en carretera según su condición, en España (Año 2004)**

Condición de las víctimas	Víctimas	Muertos	Heridos Leves	Heridos Graves	Total Heridos
Peatón sosteniendo bicicleta	75	2	62	11	73
Peatón reparando vehículo	26	1	17	8	25
Peatón aislado o en grupo	9881	327	7522	2032	9554
Conductor de animales	3	0	2	1	3
Otros	533	13	436	84	520

**Tabla 2.8 – Distribución de las víctimas de atropello en zona urbana según su condición, en España (Año 2004)**



Existen otras clasificaciones y estadísticas referentes a los atropellos producidos en España, como pueden ser por día de la semana, mes, comunidad autónoma o provincia en el que se producen, y que pueden ser consultados en algunos de los siguientes documentos [1] [7] [8] [9].

## **Conclusiones**

De todos los datos anteriores pueden extraerse algunas conclusiones:

- ♦ Al igual que ocurre con el resto de los accidentes de tráfico, las víctimas de atropellos se están reduciendo año tras año. Las causas de esta reducción son numerosas aunque tienen una gran influencia las medidas tomadas por las distintas administraciones, entidades, organismos o fabricantes de vehículos. Sin olvidar la actitud, cada día más responsable, de la mayoría de los ciudadanos.
- ♦ Durante el año 2006 el número de fallecidos por atropello en carretera y ciudad, prácticamente coinciden. La principal explicación es que a pesar de que en ciudad haya un mayor número de víctimas atropelladas, la mayor velocidad a la cual se produce el atropello en carretera hace que gran parte de los atropellos terminen con la vida del peatón. Por el contrario, en ciudad la menor velocidad de los vehículos, así como la mayor separación con los peatones, y las medidas de seguridad de los vehículos, hacen que muchos peatones atropellados únicamente resulten heridos.
- ♦ De los 4104 fallecidos en España en el año 2006, tanto en carretera como en ciudad, 565 fueron víctimas de atropellos, lo que supone un 13.7%. Esta cifra coincide con la media de los principales países europeos.
- ♦ Por edades, las personas más afectadas son las comprendidas entre los 25 y 64 años, tanto en carretera como en ciudad. Aunque este dato tiene cierta lógica considerando que la mayoría de la población española está incluida en este tramo de edad. Podría destacarse también que el colectivo de más de 65 años y de niños, hasta 14 años, se ven implicados en un gran número de atropellos. El porcentaje correspondiente a los mayores de 65 años es similar tanto en ciudad como en carretera, con un 27%. Mientras que los niños se ven afectados principalmente más en ciudad, donde son víctimas en el 16% de los casos, siendo los niños comprendidos entre 5 y 14 años los más afectados.
- ♦ La tipología de atropello de peatón, tanto en carretera como en zona urbana, que más víctimas produce, es la que engloba a peatones aislados o en grupo.
- ♦ Todos los datos confirman que cada año el número de víctimas producidas en atropellos de peatones, tiende a disminuir, a pesar de que tanto el número de habitantes como el de vehículos y conductores aumentan significativamente.

## 2.3 LESIONES

### 2.3.1 Biomecánica lesional del peatón

La dinámica de los peatones cuando son atropellados por un vehículo, la biodinámica del cuerpo humano en estos eventos y la consiguiente distribución de las lesiones sufridas está influida por factores diversos, tales como la velocidad del impacto, la tipología del vehículo, la rigidez y geometría del frontal del vehículo, la edad y la talla del peatón y la posición del peatón con relación al punto de impacto con el frontal del vehículo. En definitiva, no hay que insistir en la complejidad de esta tipología concreta de hechos lesivos.

Se ha puesto de manifiesto que la comprensión del mecanismo lesional del peatón atropellado no es sólo importante para diseñar mejores sistemas de protección, o eliminar materiales dañosos para su integridad física, sino que también es un conocimiento crítico en la gestión de las lesiones de las personas atropelladas en las salas de emergencias hospitalarias <sup>(1)</sup>Gennarelli, 1993.

Existen dos caminos de avanzar en el conocimiento de la biomecánica lesional del peatón atropellado: por un lado, se pueden realizar estudios epidemiológicos, más o menos extensos en la cantidad y calidad de la muestra, junto a estudios de investigación en profundidad y, por otro lado, se puede llevar a cabo un análisis biomecánico de cada región anatómica afectada para conocer los mecanismos lesionales y los principales parámetros que intervienen en la mayor o menor lesividad en cada registro anatómico.

---

*(1) Las referencias bibliográficas subrayadas, aparecen en los artículos de los que se ha obtenido la información, aunque no han sido incluidas en la bibliografía de este Proyecto.*

### **2.3.1.1 Acercamiento epidemiológico a las lesiones observadas en peatones atropellados**

La distribución estadística de las lesiones observadas en los peatones atropellados, según la región corporal afectada, ha sido objeto de bastantes estudios epidemiológicos realizados por investigadores de diferentes países desde los años sesenta, pero con mayor intensidad a finales de los ochenta y principios de los noventa.

Así, por ejemplo el Estudio de Datos sobre Atropellos a Peatones (Pedestrian Crash Data Study, PCDS) realizado en los Estados Unidos de Norteamérica, entre julio de 1994 y marzo de 1998, analizó un total de 521 siniestros de este tipo con una cifra global de 4.107 lesiones catalogadas. La distribución porcentual de las lesiones observadas en este trabajo se muestra en la Tabla 2.9.

La base de datos más amplia sobre atropellos a peatones se encuentra en la Facultad de Medicina de la Universidad de Hanover (MUH). Esta institución, desde 1985, ha estado llevando a cabo investigaciones en profundidad de accidentes en las escenas de los mismos de acuerdo con un plan estadístico aleatorio de muestras, por encargo y financiación de la Administración Federal de Seguridad Vial alemana (BASt). En la Tabla 2.9 se muestran los porcentajes de lesiones, en diferentes zonas corporales de los peatones, causadas por una colisión con un vehículo de motor basados en los datos recogidos en este estudio entre los años 1985 y 1998. La muestra contaba con la información de 782 atropellos en los que se registraron un total de 4056 lesiones. Sobre la base de este proyecto se inició en julio de 1999 un nuevo proyecto de investigación en donde, además de dicha universidad, participa la Universidad Técnica de Dresden (TU-Dresden). El proyecto ha sido denominado "German In-depth Accident Study" (GIDAS) y está financiado conjuntamente a través del Gobierno alemán y de la industria automovilística alemana. Puede afirmarse sin temor a equivocarse que este sistema y esta base de investigación son un ejemplo a seguir en otros países que desafortunadamente no han hecho nada más que dar sus primeros, y tímidos, pasos.

Del análisis de la información contenida en estas bases de datos se puede concluir que las lesiones más frecuentes en los atropellos se localizan en la cabeza, -una media del 31,4 %-, y en las extremidades inferiores, -con un valor porcentual de 32,6 %-. La Tabla 2.9 expone ordenadamente cuatro ejemplos de la distribución de lesiones por zonas del cuerpo observadas en estudios con muestras significativas, salvo el estudio australiano:

<b>Región corporal</b>	<b>USA (n=518)</b>	<b>Alemania (n=782)</b>	<b>Japón (n=240)</b>	<b>Australia (n=65)</b>	<b>TOTAL</b>
Cabeza	32,7 %	29, 9 %	28,9 %	39,3 %	31,4 %
Cara	3,7 %	5,2 %	2,2 %	3,7 %	4,2 %
Cuello	0,0 %	1,7 %	4,7 %	3,1 %	1,4 %
Pecho	9,4 %	11, 7 %	8,6 %	10,4 %	10,3 %
Abdomen	7,7 %	3,4 %	4,7 %	4,9 %	5,4 %
Pelvis	5,3 %	7,9 %	4,4 %	4,9 %	6,3 %
Brazos	7,9 %	8,2 %	9,2 %	8,0 %	8,2 %
Piernas	33,3 %	31,6 %	37,2 %	25,8 %	32,6 %
Desconocido	0,0 %	0,4 %	0,0 %	0,0 %	0,2 %
<b>TOTAL</b>	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

**Tabla 2.9 – Distribución de las lesiones (AIS 2-6) apreciadas en peatones atropellados (Mizumo, 2005)**

El término AIS mencionado en la tabla superior hace referencia a Escala AIS (Abbreviated Injury Scale), que podría traducirse como la escala abreviada de lesión, y que se publicó por primera vez en 1971. Desde entonces, ha sufrido diversas modificaciones, desde la versión de 1985, 1990, 1998, 2005 y finalmente 2008 [10]. Por mayor simplicidad se presenta la AIS 85, ya que es a la que se hace referencia en este apartado. Se trata básicamente de un sistema de clasificación de las lesiones traumáticas en siete categorías, a las que se les asigna un número entero entre 0 y 6, correspondiendo los valores más elevados a las lesiones más severas. En la Tabla 2.10 se indica el significado dado a cada uno de los números AIS. Los valores de la última columna indican el rango de fatalidad asociado a cada valor AIS del 1 al 5, basados en estudios retrospectivos sobre víctimas de accidentes de tráfico [11].

<b>AIS</b>	<b>Severidad</b>	<b>% Fatalidad</b>
0	Ninguna	
1	Menor	0.0
2	Moderada	0.1-0.4
3	Sería	0.8-2.1
4	Severa	7.9-10.6
5	Crítica	53.1-58.4
6	Máxima lesión (virtualmente sin posibilidades de supervivencia)	100

**Tabla 2.10 – Correspondencia entre los niveles de la escala AIS, su severidad y fatalidad**

En la siguiente tabla se muestran ejemplos de índices de severidad AIS asignados a las lesiones más frecuentes.

<b>AIS 85</b>	<b>Cabeza</b>	<b>Tórax</b>	<b>Abdomen y contenido de la Pelvis</b>	<b>Columna</b>	<b>Extremidades y hueso de la Pelvis</b>
1	Dolor de cabeza o mareos	Fractura de una costilla	Corte superficial de pared abdominal	Esguince local, sin fractura ni dislocación	Fractura de dedo del pie
2	Inconsciente menos de 1 hora; fractura lineal	Fractura de 2 o 3 costillas; fractura de esternón	Corte o contusión de hígado, bazo o riñón	Fractura menos sin daño a la médula	Fractura simple de tibia, peroné o pelvis
3	Inconsciente de 1 a 6 horas; fractura hacia dentro	Fractura de 4 o más costillas, 2 o 3 costillas fracturas y hemo o pneumotórax	Corte severo en bazo o riñón	Disco roto con daño a la raíz del nervio	Dislocación de rodilla; fractura de fémur
4	Inconsciente de 6 a 24 horas; fractura abierta	Fractura de 4 o más costillas con hemo o pneumotórax	Corte severo en hígado	Rotura parcial de médula	Amputación o fractura múltiple por encima de la rodilla (cerrada)
5	Inconsciente más de 24 horas; gran hematoma (100 cc)	Corte parcial de la aorta	Rotura de riñón, hígado o colon	Cuadriplegia	Fractura múltiple de pelvis (abierta)

**Tabla 2.11 – Ejemplos de lesiones según su nivel en la escala AIS**

En la Figura 2.1 se puede ver el esquema de las zonas corporales representativas que resultan lesionadas (círculos) en un atropello de un peatón adulto por el frontal de un vehículo, mostrando las trayectorias de la cabeza con respecto a coches pequeños (rojo) y grandes (negro), los cambios de localización del impacto de la cabeza a dos velocidades de impacto distintas (20 Km/h-40 Km/h), y la Distancia de Envolvimiento Alrededor del capó (Wrap Around Distance, WAD en azul), que es la distancia desde el suelo al punto de impacto en el capo o en el parabrisas a lo largo de la estructura del frontal del vehículo.

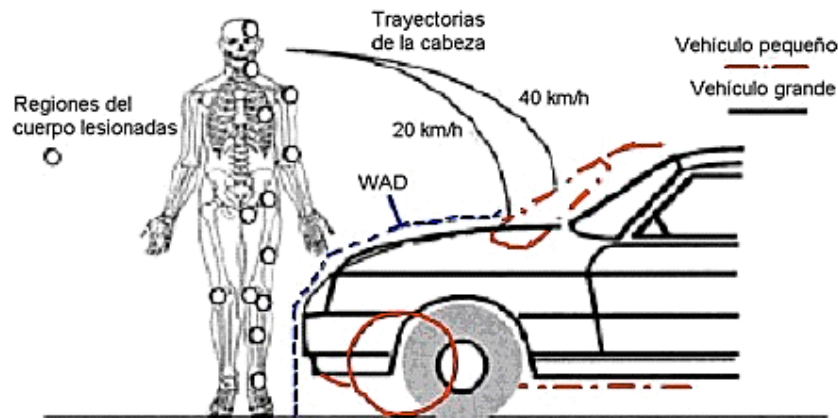


Figura 2.1 – Regiones del cuerpo lesionadas y trayectorias de la cabeza (Yang, 2002)

La localización del punto de impacto de la cabeza en el vehículo depende en gran manera del tamaño y la forma del vehículo, y de la altura del peatón. La velocidad de impacto del vehículo también tiene una influencia determinante en la distancia a la cual golpea la cabeza del peatón. Para un peatón adulto, el punto de impacto en el vehículo, generalmente, se encuentra entre la parte final del capó, en el pilar A y en el cristal del parabrisas. Pueden encontrarse casos hasta en la parte superior del parabrisas o, en casos excepcionales, en el techo del vehículo.

Siguiendo con la misma fuente utilizada arriba, la Unidad de Investigación de Accidentes de la Facultad de Medicina de la Universidad de Hanover, se pueden comprobar en la Figura 2.2 los porcentajes de lesiones en diferentes zonas anatómicas del cuerpo de los peatones causadas por una colisión con un vehículo de motor, basados en la información recogida en su base de datos en profundidad. Además, a la derecha se pueden ver los componentes del vehículo y de la propia carretera que, habitualmente, causan las citadas lesiones.

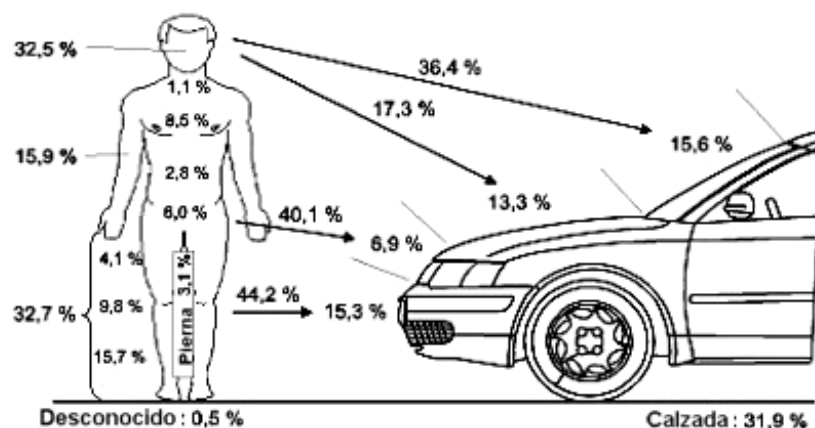


Figura 2.2 – Distribución de las lesiones corporales por atropello y las zonas del vehículo que las producen (Kalliske-Friesen, 2002)

El examen de las diferentes áreas del frontal del vehículo en consideración a su influencia en las lesiones muestra que el 15,6% de las lesiones son causadas por el cristal del parabrisas y su marco, el 13,3% por la parte superior del capó o las aletas, el 6,9% por la parte superior del frontal y el 15,3% por el parachoques. Estos porcentajes suman el 83%, y el resto hasta alcanzar el total comprende los casos desconocidos y las lesiones causadas por otras partes del vehículo. Si lo referimos a las lesiones individualmente consideradas, por ejemplo la cabeza, se observa que el 36,4% de las lesiones son causadas por el parabrisas y su marco y el 17,3% son debidas al capó. En cambio en lo que a la cadera se refiere, el 40,1% de las lesiones registradas en esta región corporal son debidas a la parte superior del frontal del vehículo. Baste añadir, que el 44,2% de las lesiones en las piernas son consecuencia del impacto con el parachoques.

Resulta obvio destacar el efecto que tienen los parámetros de diseño del vehículo, tales como la altura, el ángulo de ataque y la rigidez del parachoques o la longitud y la rigidez del capó, en la severidad de las lesiones causadas a los peatones.

### **2.3.1.2 Análisis de las lesiones producidas por el atropello por registros anatómicos**

Los estudios biomecánicos identifican los mecanismos lesionales, los criterios de evaluación de la resistencia biomecánica de cada órgano o biomaterial y los umbrales de tolerancia a los diferentes tipos de cargas y esfuerzos. Varios organismos, empresas e instituciones nacionales e internacionales han señalado o dispuesto, en su caso, diferentes criterios de lesión y valores para los niveles máximos de tolerancia de cada una de las partes del cuerpo. A continuación se desgranar de forma sintética los resultados de estos estudios, según las regiones anatómicas en que se suele descomponer el cuerpo humano.

#### ***La cabeza***

La cabeza se compone de una estructura ósea, denominada cráneo, que rodea y protege al contenido intracraneal integrado, fundamentalmente, por el cerebro, el cerebelo y el tronco del encéfalo.

Según la mayoría de los autores anglosajones, las lesiones más frecuentemente observadas en la cabeza de los peatones, a consecuencia de los Traumatismos Craneoencefálicos (TCE) sufridos, son las fracturas craneales, incluyendo las laceraciones, las contusiones, los diferentes tipos de hematomas intracraneales y el Daño Axonal Difuso (DAI).

Las lesiones de la cara son heridas, raspaduras, cortes o lesiones debidas a la proyección sobre el parabrisas de un vehículo ligero, lo que explica también las heridas en los párpados, así como heridas más graves del globo ocular. En cambio, las fracturas de la cara, al margen de las clásicas fracturas nasales, no se encuentran en gran número; mientras que las fracturas del macizo facial se asocian, habitualmente, con lesiones masivas del cráneo (*Jouvence!, 2000*)

Estos traumatismos se producen por el impacto directo de una parte del vehículo sobre la cabeza o, más frecuentemente, por el choque de la cabeza contra el suelo u otro obstáculo cualquiera. Cuando esto sucede se pueden observar tres tipos distintos de mecanismos de lesión:

- ◆ Lesiones frente al impacto craneal: lesiones por impacto.
- ◆ Lesiones inerciales o de contra golpe: el cerebro golpeando la tabla interna de la bóveda craneana del lado opuesto al choque, por un mecanismo indirecto de agitación.
- ◆ Lesiones de desaceleración.

Las lesiones en la cabeza dependen, principalmente, de la duración del impacto y de su localización en el cráneo, así como de la rigidez de la zona superficial de contacto de la parte superior del capo y el parabrisas, de tal forma que cuando la fuerza de impacto sobrepasa el nivel de tolerancia, el hueso craneal se fractura.

Por otro lado, si un peatón es golpeado por un móvil, mientras se desplaza a gran velocidad, la masa encefálica que tiene la consistencia de gel, se aplasta o comprime contra las paredes internas de la bóveda craneal, produciéndose de esta forma contusiones hemorrágicas de los lóbulos frontales y temporales de una parte, y del tronco cerebral por otra. De la misma forma, cuando la cabeza es objeto de una carga de inercia en una aceleración angular, habrá un movimiento relativo entre el cráneo y el cerebro.

La cabeza del peatón cuando contacta con el frontal del coche está sometida a la fuerza directa del impacto y a una fuerza de rotación debida a la aceleración angular, así pues el peatón puede tener una lesión compleja de cráneo-cerebro originada por la respuesta combinada a ese tipo de impacto.

El indicador HIC ha sido desarrollado para medir las aceleraciones lineales que actúan sobre las cabezas de los seres humanos, ya sean ocupantes de un vehículo o peatones, calculado según la siguiente ecuación:



$$HIC = (t_2 - t_1) \times \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a_{res} \times dt \right)^{2.5} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

donde  $t_2$  y  $t_1$  son dos tiempos arbitrarios durante el pulso de aceleración debido al impacto en el hueso frontal. La aceleración lineal resultante en el centro de gravedad de la cabeza es medida en múltiplos de la aceleración de la gravedad ( $g$ ) y el tiempo es medido en segundos.

No tiene en cuenta la influencia de algunos factores, tales como la aceleración rotacional de la cabeza, o cualquier efecto de la localización del impacto en la cabeza, aunque tiene a su favor que es utilizado, casi universalmente, en la investigación de las lesiones producidas por todo tipo de colisiones.

El periodo de tiempo necesario para el cálculo del HIC ha sido establecido en 15 milisegundos y su valor máximo en 1000. Cuando el HIC supera ese valor se considera que ha alcanzado el umbral a partir del cual se esperan lesiones en las personas que sufren aceleraciones lineales de esa magnitud. El valor 1.000 en el HIC se corresponde con un 16 por ciento de riesgo de causar unas lesiones en la cabeza de una severidad catalogada como AIS 4 o superior.

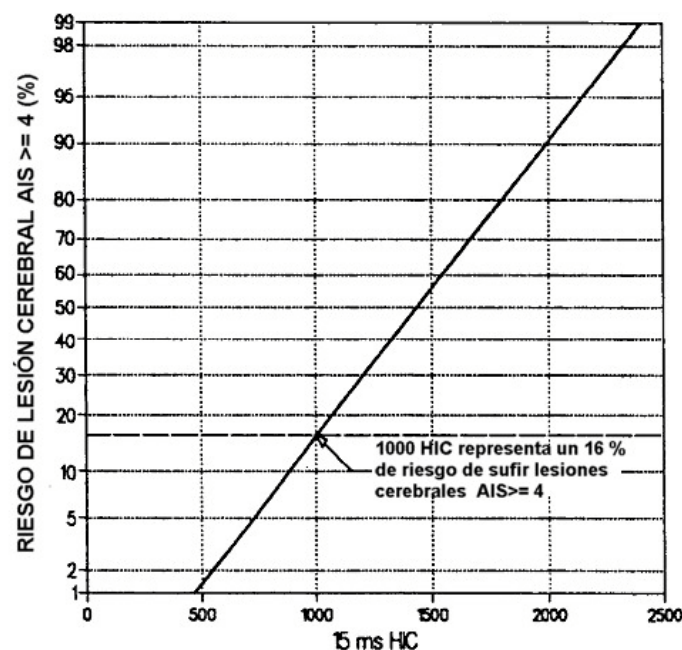


Gráfico 2.7 – Curva de correlación entre el Riesgo de lesiones cerebrales y el índice HIC a 15 ms. (Mertz, J, 1994).

De la misma forma, a un valor del HIC de 1450 le corresponde un 50% de probabilidades de fractura de cráneo, mientras que un nivel del HIC de 700 se relaciona con un 5% de probabilidades de que suceda lo mismo.

Existe una cierta controversia sobre la validez del HIC como parámetro para determinar la probabilidad de observar lesiones en los seres humanos. Se han aportado diversos argumentos para criticarlo, el principal es que el HIC es sólo una medida de la aceleración lineal en el centro de gravedad de la cabeza. Obviamente, tal y como se ha apuntado arriba, las aceleraciones angulares, también, causan deformaciones y lesiones en el cerebro. Sin embargo, los límites de las aceleraciones angulares no han sido, todavía, establecidas para la cabeza humana. Algún trabajo aislado ha situado el límite cercano a los 13.600 rad/sg<sup>2</sup>, pero no está claro que éste sea un valor definitivo. Actualmente se cree que la investigación de los efectos combinados de las aceleraciones, angular y lineal, en la lesividad en la cabeza, en general, y en la lesividad cerebral, en particular, pasa por crear y desarrollar modelos matemáticos detallados de la cabeza humana. Estos modelos deberían ser validados mediante estudios en profundidad sobre atropellos a peatones.

### ***El cuello***

La cinemática del peatón al ser golpeado por un vehículo puede llevar a pensar que la columna vertebral y, específicamente, su zona cervical puede estar sometidas a importantes sollicitaciones. De hecho a nivel cervical se aprecian movimientos de hiperextensión, por aplastamiento de la cabeza contra las estructuras del vehículo, o hiperflexión, en la caída dorsal al suelo. En algunos casos, aparecen asociadas a alteraciones neurológicas (*Jouvencel, 2000*).

La propuesta de actualización del ensayo de choque frontal, según la legislación de los EEUU, incluye algún criterio actualizado como el Neck Injury Criteria (NIC), que tiene en cuenta tanto esfuerzos como momentos medidos durante el ensayo y se define como:

$$N_{ij} = \frac{F_z}{F_{int}} + \frac{M_y}{M_{int}} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

El nivel actual de tolerancia para la compresión axial fue establecido por Mertz en 1978. La tolerancia a compresión varía con la duración de la carga de aplicación, con un valor pico de 4000 N. De igual forma Nyquist estableció, en 1980, que los límites para las cargas de tensión y de cizalladura estaban en 3.300 N y 3.000 N respectivamente. Los valores de la tolerancia a flexión y a los momentos de extensión y flexión están basados en los tests llevados a cabo por Mertz, en 1971, con voluntarios y cadáveres.

### ***El tronco***

El tórax es un cilindro de forma irregular coronado en su porción superior por la unión con el cuello, y en su límite inferior por una amplia abertura limitada por el diafragma.

En la parte inferior del tronco se encuentra la cavidad abdominal, que continúa la forma cilíndrica del tórax o incluso se ensancha formando una especie de tronco de cono. La parte inferior del abdomen se encuentra apoyada sobre las caderas y la pelvis. En el tórax se encuentran los pulmones y el corazón, mientras que en el abdomen existen una serie de órganos sólidos, - hígado, bazo, páncreas, riñones y glándulas suprarrenales-, y otros huecos, - esófago, estómago, y los intestinos -. También tienen interés otros órganos que pertenecen a la cavidad pélvica como pueden ser la vejiga y, en su caso, el útero y los ovarios.

Los traumatismos torácicos pueden causar fracturas de la parrilla costal, del esternón y lesiones broncopulmonares.

Las lesiones de tórax pueden atribuirse a tres mecanismos: la compresión del tórax, la carga viscosa dentro de la cavidad torácica, y la carga de inercia de los órganos internos. La fuerza de compresión en el tórax puede producir la fractura de costillas, fractura de esternón, hemotórax y neumotórax. La viscosidad y la carga de inercia interna puede causar contusiones en los pulmones y rotura de venas. Las lesiones de tórax en accidentes suelen ser, a menudo, el resultado de una combinación de estos tres mecanismos lesionales.

No existe un criterio definido para medir el riesgo de lesión en el tórax en el caso de los peatones. La NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration) ha establecido el Índice de Daño Torácico (Thoracic Trauma Index, TTI) como criterio para utilizar en los tests de impacto lateral. Este índice se calcula usando la fórmula siguiente:

$$TTI(d) = \frac{1}{2}(G_r + G_{ls}) \quad \text{Ecuación 2.3}$$

donde:

- ♦  $G_r$  es el mayor de los picos de aceleración soportados tanto por las costillas superiores como por las inferiores.
- ♦  $G_{ls}$  el menor pico de aceleración en la medula espinal (T12).

El límite establecido por la NHTSA para el índice TTI alcanza el valor de 90 g's para un vehículo de pasajeros con dos puertas laterales. Yang sitúa este límite para peatones en 85 g's, en su informe a la Red Europea de Seguridad Pasiva (EPSN) (*Yang, 2002*).

### **La pelvis**

Dentro del sistema óseo del cuerpo humano, la pelvis es la estructura que soporta el tronco y transmite los esfuerzos procedentes de la columna vertebral a las

extremidades inferiores, a las que se encuentra conectada mediante las articulaciones coxofemorales.

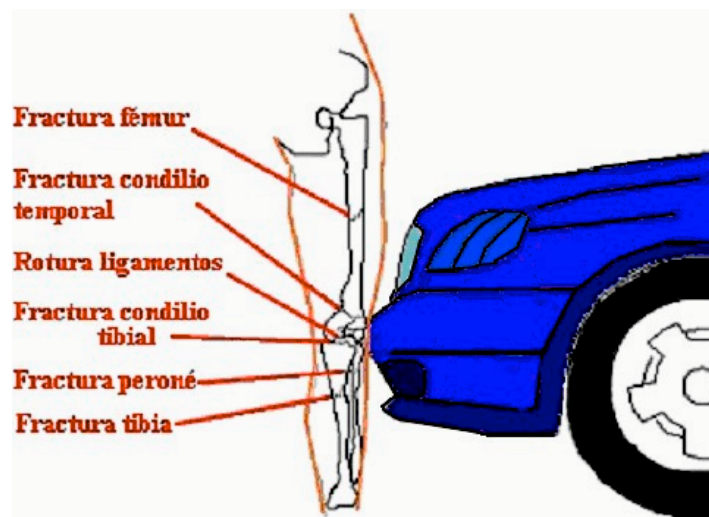
Las lesiones más frecuentes en peatones, y también en conductores y ocupantes de motocicletas, ciclomotores y bicicletas, son las fracturas abiertas, las fracturas de diversas zonas del mismo hueso y los focos de fractura conminuta. Las fracturas de pelvis, especialmente las clasificadas como inestables, son las que mayor riesgo vital suponen para el peatón, dentro siempre de las del aparato locomotor.

Los mecanismos lesionales en las fracturas de pelvis, en sus diversos subtipos y diferentes grados, son tres: la rotación externa, la compresión lateral y el cizallamiento. Las lesiones por rotación externa proceden tanto de la compresión anterior directa sobre la sínfisis púbica como de una rotación externa brusca de las caderas, típica en atropellos a altas velocidades. En impactos inferidos por un vehículo a un peatón, una carga lateral concentrada en la pelvis por el borde del capo, y en la zona superior del fémur, tiene como resultado lesiones por compresión. Estas lesiones, frecuentemente, afectan a una o más de las siguientes zonas anatómicas: sínfisis púbica, rama púbica, acetabulo (zona de cadera), cabeza femoral y zona proximal del fémur.

Se ha propuesto por parte de Cesari, en 1982, como umbral de rotura de la pelvis un pico de fuerza medio de 10 kN, para ser aplicado a un test con un subsistema impactador de 11,1 kg (*Walz et al, 2005*). Este impactador registra fuerzas y momentos flectores, así un momento flector de 300 Nm se asocia con una probabilidad de fractura de fémur o pelvis del 18 % y una fuerza resultante de 5 kN se asocia con la misma probabilidad de fractura (*Arregi-Luzón, 2007*). Estas dos cifras son las que utiliza como referencia EuroNCAP en sus valoraciones de los vehículos nuevos.

### ***Las extremidades inferiores***

Las lesiones de las extremidades inferiores, casi con toda probabilidad, son causadas por el impacto del frontal del vehículo. La Figura 2.3 muestra una representación esquemática de las principales lesiones que se producen como consecuencia de un atropello en el que la posición del peatón es lateral. Una fuerza de impacto lateral que aplique una carga de torsión axial en la pierna, puede producir múltiples lesiones.



**Figura 2.3 - Lesiones principales producidas de las extremidades inferiores del peatón a consecuencia del atropello. (Yang, 2002)**

Las tipologías lesionales en las extremidades inferiores más comunes en este tipo de atropellos son las fracturas de huesos largos (fémur, tibia y peroné), las lesiones de rodilla y los esguinces o fracturas del tobillo o del pie. Sin lugar a dudas, son unas de las lesiones más comunes en los atropellos no mortales a peatones. Por ejemplo, en los datos de accidentes recogidos en un estudio británico, las lesiones en las extremidades inferiores alcanzaban el 67 % en las víctimas con lesiones menos graves y el 72 % en las víctimas que presentaban lesiones graves no mortales (*Ashton y Mackay, 1979*). De forma parecida, datos más recientes, de 1996, sobre Japón aportados por el estudio denominado ITARDA han señalado que las extremidades inferiores son las partes del cuerpo más comúnmente lesionadas, alrededor del 40 %, con la mayoría de las lesiones graves.

Las cargas sobre las extremidades inferiores son típicamente aplicadas de forma lateral. Condiciones de carga éstas que difieren de aquellas otras que soportan los ocupantes o el conductor de un vehículo que probablemente sufrirán el impacto en la dirección paralela al plano sagital. Las lesiones observadas en los peatones a consecuencia de su impacto con un vehículo son, desde este punto de vista, únicas.

Estas lesiones son la consecuencia normal del impacto en la pierna del peatón de alguna de las partes del frontal del vehículo, tales como el parachoques, el capó y la parte superior del frontal. Este tipo de impacto y la subsiguiente aceleración transmitida a las extremidades inferiores tiene como resultado que se observen mecanismos complejos de lesión. Se han apuntado como mecanismos de lesión en las extremidades inferiores (*Arregui-Luzón, 2007*): primero, la aceleración de la tibia en la parte proximal; y segundo, el desplazamiento.

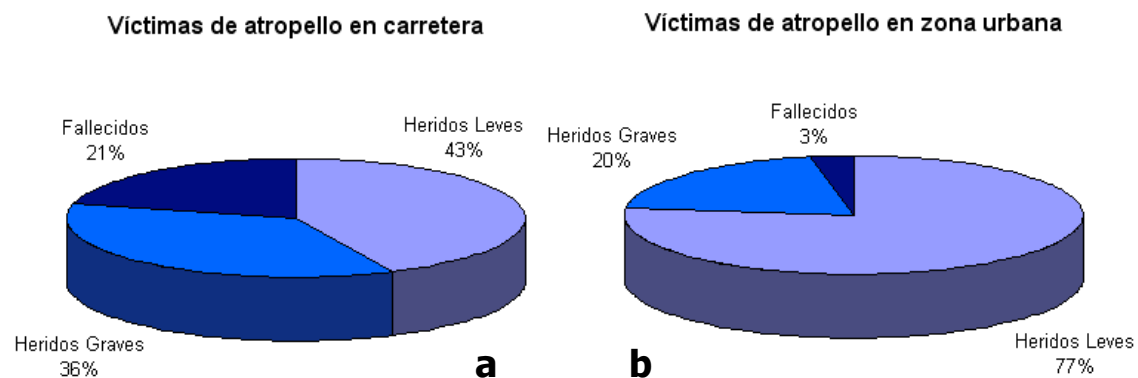
Los dos mecanismos lesionales más importantes, relacionados con la producción de lesiones en las extremidades inferiores del peatón al impactar con el paragolpes del vehículo, son el cizallamiento, -shearing-, y la doblez lateral, -bending-, (*Kajzer et al., 1997*).

No existe un indicador único aplicable a todos los huesos, articulaciones, músculos y ligamentos de las extremidades inferiores, pero la siguiente tabla resume perfectamente los valores umbral de aplicación usual en cada uno de los principales huesos de esta región anatómica:

Región Corporal	Fuerza Compresión Axial [kN]		Fuerza de Torsión[Nm]		Momento de Flexión [Nm]		Fuerza Transversal [kN]	
	Masculino	Femenino	Masculino	Femenino	Masculino	Femenino	Masculino	Femenino
Femur	3'0 – 10				320			
	7'7	7'1	175	136	310	180	3'9	2'6
Tibia							2'5 – 8	
					317±88	278±30	4'7±1'4	4'1±1'2
	10'4	7'5	89	56	7	124	3'4	2'3
Peroné	0'6	0'5	9	10	27	17	0'5	0'3

**Tabla 2.12 - Valores límite de las fuerzas y momentos aplicados a las extremidades inferiores (Yang, 2002)**

Para concluir con este apartado dedicado a las lesiones producidas en los atropellos de peatones, se muestran dos gráficos sobre la distribución de heridos(leves y graves) y muertos, tanto en carretera como en zona urbana, en España durante el año 2004 [1]. Puede destacarse que los atropellos producidos en carretera provocan un alto porcentaje de heridos graves y muertos, mientras que en ciudad el mayor porcentaje de víctimas únicamente sufre heridas leves. Este hecho está directamente relacionado con la mayor velocidad a la cual se producen los atropellos en carretera.



**Gráfico 2.8 – Distribución de las víctimas producidas en atropellos en España (Año 2004) a) En carretera. b) En zona urbana.**

Este apartado 2.3 ha sido extraído casi en su totalidad del artículo "La reconstrucción de accidentes. El atropello de peatones (3ª parte)". (*San Román García, J. L.*).

## 2.4 FASES DE UN ATROPELLO

En este apartado del Capítulo 2 se tratan las diferentes fases, espacio-temporales, en las cuales puede dividirse un accidente de tráfico, particularizando para el caso de un atropello de peatón. Aunque antes, es necesario considerar algunas definiciones importantes.

*Accidente.* No existe una clara definición de un accidente, y más concretamente, de un accidente de tráfico. Sin embargo, existen algunas que habitualmente se utilizan.

- ♦ “Suceso eventual o acción que involuntariamente resulta daño para las personas o las cosas”. “Suceso eventual que altera el orden regular de las cosas” [12]
- ♦ “Transferencia no controlada de energía que produce como consecuencia lesiones o muertes en las personas”[13].

Cuando se define el accidente de tráfico se emplean definiciones parecidas, aunque más detalladas:

- ♦ “Aquel suceso eventual, producido como ocasión del tráfico, en el que interviene alguna unidad de circulación y como resultado del cual se produce muerte o lesiones en las personas o daños en las cosas”. [13]

Según la Orden Ministerial de 1993 que establece el concepto normativo de accidente, un *accidente de circulación* se define como:

- ♦ “Son objeto de accidentes de circulación con víctimas los que reúnan las condiciones siguientes”:
  - a.- producirse en vías o terrenos objeto de la legislación sobre tráfico circulación de vehículos de motor y seguridad vial.
  - b.- consecuencia del mismo resulte: una o varias personas muertas o heridas, o sólo daños materiales.

Además, esta Orden Ministerial especifica el accidente denominado *atropello*:

- ♦ “Se denomina atropello a aquel en el que se ven implicados una unidad de circulación y un peatón o animal”

De la que surge la necesidad de definir el término *peatón*:

“Toda persona que, sin ser conductor, se encuentra transitando a pie por las vías o terrenos objeto de regulación de la Ley sobre tráfico, circulación de vehículos a motor y seguridad vial.”

A estos efectos, desde el punto de vista de la seguridad vial, el concepto de peatón se entiende desde una perspectiva más amplia, considerando también peatones quienes



empujan o arrastran un coche de niño, o de un impedido o cualquier otro vehículo de pequeñas dimensiones, los que conducen a pie un ciclo o ciclomotor de dos ruedas, y los impedidos que circulan al paso de una silla de dos ruedas con o sin motor, así como aquellas personas que circulan sobre patines u otros artefactos parecidos por las vías o terrenos descritos anteriormente. Son igualmente peatones aquellas personas que por ejemplo se encuentren reparando un motor, cambiando neumáticos o realizando otra operación similar junto al vehículo en cualquier vía.

Una vez se han definido algunos conceptos es posible comenzar a definir las fases de un accidente de tráfico [13]. Los accidentes de circulación pese a su rapidez no se producen de una manera instantánea. Como cualquier fenómeno presenta una evolución que se desarrolla en unas coordenadas espacio-temporales y sufre, por lo tanto, una serie de sucesivas circunstancias que se van encontrando hasta producirse el resultado final.

*TIEMPO*: el tiempo del accidente se descompone en una serie de “momentos” en los cuales las personas intervinientes en el accidente han debido obrar en un determinado sentido, lo hayan hecho o no.

*ESPACIO*: el espacio consta de una serie de “áreas o zonas” y dentro de ellas, unos puntos en los que se sitúan situaciones concretas.

La unión de un “punto” (espacio) y un “momento” (tiempo) es la unión de las coordenadas espacio-tiempo que dará lugar a “una posición”, las distintas posiciones del accidente se unen en “fases”. Tradicionalmente pueden distinguirse tres fases:

- ♦ Fase de percepción.
- ♦ Fase de decisión.
- ♦ Fase de conflicto.

En el caso particular de un atropello, estas tres fases aparecen en la siguiente secuencia de eventos (*Campón Domínguez*):

### **2.4.1 Preimpacto**

Para determinar como se produce el atropello a un peatón es necesario introducir una serie de conceptos espaciotemporales que nos permiten analizar las conductas, comportamientos o conocimientos que en cada momento tuvo o pudo tener el conductor del vehículo, y en nuestro caso, el peatón implicado.



En primer lugar, el tiempo durante el que transcurre el atropello, ha de ser reconstruido secuencialmente a partir de momentos, en los que las personas que en él intervienen han debido obrar de una manera determinada.

Como segundo paso, el espacio comprendido en el tramo de vía y su entorno inmediato en el que se desarrolla el atropello se distribuye en áreas o zonas en las que se producen las acciones y movimientos, tanto del peatón como del conductor. Dentro de estas áreas se sitúan determinados puntos singulares, en donde se realizan o se deberían haber realizado acciones concretas individualizadas.

Finalmente, la posición se define como el conjunto de un momento, es decir, el tiempo en el que la persona ha debido obrar de una manera determinada, y lo ha hecho o no, y un punto, espacio físico donde situar acciones concretas. La unión de varias posiciones dará lugar a una fase del atropello.

La secuencia general de eventos en un atropello de un peatón se inicia cuando el peatón se introduce en la calzada o, en algunos casos, cuando el vehículo a motor abandona la calzada y entra en un área donde los peatones pueden caminar.

Frecuentemente esta fase inicial también marca el comienzo del periodo de percepción y del tiempo de reacción tanto para el conductor como para el peatón.

### La posición de percepción posible (PPP)

Es el momento y lugar donde el movimiento o condición inesperada o extraordinaria, que podía desembocar en un accidente, puede haber sido percibido por una persona normal. En el supuesto que nos ocupa es la posición donde el peatón se hace visible para el conductor, es decir, donde es posible que el conductor viera al peatón.

Es durante la parte más temprana del intervalo de la percepción cuando el peatón se convierte potencialmente en visible por primera vez para un conductor atento y el vehículo a su vez resulta visible para un peatón atento. En la mayoría de los casos, el vehículo de motor será más fácilmente discernible para el peatón que a la inversa.

Seguido de este primer punto de percepción potencial, las partes implicadas pueden entrar en la fase de identificación y observación. Si no hay detección de un objeto, no puede comenzar la percepción ni el proceso de respuesta. La respuesta (reacción) es un producto de la detección, identificación y el análisis.

### La posición de percepción real (PPR)

Es el momento y lugar en el cual el conductor o peatón percibió, realmente, por primera vez el peligro o la situación anormal. Esta es la posición donde el conductor a través de sus sentidos, la vista, se apercibe de la presencia del peatón.

Los pasos, tal y como se desarrollan secuencialmente, son:

- ◆ El peligro, en este caso el peatón, se convierte en visible para el conductor
- ◆ El peligro es visto por el conductor
- ◆ El peligro es identificado como tal por el conductor
- ◆ Se le asigna un “nivel de amenaza” a este peligro inmediato relacionándolo con otros peligros de la calzada y/o su entorno inmediato.

O expuesto en forma de tabla:

<b>PERCEPCIÓN – TIEMPO DE REACCIÓN</b>		
<b>Percepción Detección Identificación Análisis</b>	<b>Reacción Decisión Respuesta</b>	<b>Resultado Cambio de velocidad o dirección</b>
El peligro se convierte en visible.		
El peligro es visto por primera vez	El conductor decide lo que hacer.	Ocurre el cambio de velocidad o dirección.
El peligro es identificado como tal	El conductor hace algo.	
Se les asigna un determinado nivel de riesgo		

**Tabla 2.13 – Fases generales de un accidente de tráfico**

Asumiendo que hubiera una observación e identificación del peatón, es durante esta primera parte de este intervalo cuando el peatón se mueve a una posición próxima a la calzada, o dentro de la misma, donde puede ser visible para el conductor y, posteriormente, ser clasificado como un peligro. Esta no es la posición donde el peatón o el vehículo es realmente visto y reconocido por la otra parte, sino que se trata del lugar donde ellos realmente están en la primera posición que es potencialmente visible para el otro. Una vez en esta posición, el siguiente paso es que ellos vean y reconozcan al otro como lo que son, para el conductor del vehículo o para el peatón: un peligro potencial.

Durante esta fase es importante definir y destacar dos conceptos que intervienen de forma significativa en todo el proceso del atropello, el tiempo de reacción y el retardo en el sistema de frenado.

### **Tiempo de reacción**

En Psicología, el tiempo de reacción es el intervalo que transcurre entre un estímulo sensorial y su correspondiente reacción voluntaria, que puede ser más o menos automática. Es el tiempo que se requiere, a partir de la percepción, para tomar el control del vehículo realizando operaciones tácticas o estratégicas, o en otras palabras, es el tiempo requerido para decidir lo que hacer y comenzar a hacerlo.

En relación con los puntos definidos con anterioridad, el tiempo de reacción sería el que transcurre entre el punto de percepción real, donde el conductor se da cuenta de la situación de peligro; y el punto de ejecución de la decisión, donde el conductor ya ha decidido y comienza a ejecutar la maniobra evasiva.

La utilidad del tiempo de reacción a efectos de conocer el mecanismo de producción del atropello es doble: por un lado, sirve para comparar la mejor reacción posible, teniendo en cuenta las circunstancias en las que se produjo el suceso, con las maniobras evasivas realmente llevadas a cabo, ayudando de esta forma a evaluar los conocimientos y habilidades de un conductor o un peatón; y por otro lado, se utiliza para establecer la posible deceleración o distancia de parada de un vehículo a una velocidad determinada.

Desde un punto de vista "ex post" tan importante como la rapidez en la percepción del peligro y la inmediata realización de una acción evasiva será la correcta evaluación de las posibilidades que tiene el conductor y una precisa ejecución de dicha maniobra. El grado de conocimientos y pericia que tenga el conductor sobre la forma de actuar en estas circunstancias, también es un factor a tener en cuenta a la hora de valorar su acción.

La jurisprudencia alemana, desde hace décadas tiene en cuenta el tiempo de reacción, bajo la denominación "Tiempo de susto". Por este motivo sus Tribunales estiman que, por regla general, el conductor puede tardar en reaccionar o frenar 0,8 segundos, sin que esta tardanza se le reproche como imprudente. Por el contrario, la tardanza en reaccionar condicionada por la embriaguez no favorece al conductor. Luego, de aquí se deduce que es necesario llevar a cabo un estudio de evitabilidad del suceso como primer paso para determinar el reproche penal al conductor a título de imprudencia.

### **Retardo del sistema de frenado**

Es el tiempo que transcurre desde que el conductor pisa el pedal del freno hasta que la rueda bloquea o alcanza su máxima eficacia. Diversos ensayos reales indican que, para turismos con el sistema de frenado en buen estado, el tiempo de respuesta está comprendido entre 0,25 y 0,6 segundos.

### **La posición de ejecución de la decisión (PED)**

Es aquel momento y lugar en el que el conductor o el peatón reacciona ante el estímulo exterior, es decir, adopta una decisión para hacer frente al peligro o situación anormal que ha percibido e inicia su ejecución, generalmente, en forma de maniobra evasiva. Entre el punto de percepción real y el punto de ejecución de la decisión, el conductor identifica al peatón como tal y hace un juicio de previsibilidad del nivel de riesgo que le pueden suponer las acciones siguientes del peatón. Generalmente la pregunta será ¿Va a cruzar? La evaluación de este riesgo está íntimamente relacionada con la decisión sobre qué acción realizar en el supuesto que realmente el peligro llegue a confirmarse y la secuencia desemboque en una situación de emergencia.

### **La acción evasiva**

Es la maniobra o conjunto de ellas que emplea el conductor o peatón para evitar la producción del accidente. Los diferentes tipos de maniobras evasivas fundamentales se pueden enunciar de la siguiente forma:

- |                                      |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| ♦ Deceleración (progresiva o brusca) | ♦ Giro a la izquierda. |
| ♦ Aceleración                        | ♦ Marcha atrás.        |
| ♦ Giro a la derecha.                 | ♦ No hacer nada        |

Se pueden realizar maniobras de evasión complejas, que sean la realización simultánea o sucesiva de varias maniobras simples de las arriba enunciadas. La reacción del conductor a la situación no es el único factor de decisión; la elección por parte del peatón de su acción u omisión puede también influir el resultado final de la cadena de sucesos.

### La posición clave (PCL) o posición de no escape

Es aquel momento y lugar en el cual el accidente resulta inevitable, es decir, el accidente se producirá ya independientemente de la voluntad del conductor. Es determinable en función de la posibilidad de realizar cálculos matemáticos a partir de los datos de campo disponibles. Su importancia es vital para el análisis jurídico de la conducta del conductor del vehículo, sobre todo en relación con el deber de cuidado subjetivo, que exige que la conducta anómala del peatón sea evitable siempre que no exista vulneración de la norma de cuidado por parte del conductor.

## **2.4.2 Impacto**

En un atropello el peatón sufre varias colisiones sucesivas, principalmente, con el vehículo y con el suelo, aunque a veces puede impactar con otros vehículos, árboles, biondas, y bordillos, entre otros obstáculos.

### El punto de atropello (PC)

Es aquel momento y lugar en el que se consuma el accidente y que corresponderá a la posición en la que se produce el primer contacto entre el cuerpo del peatón y el vehículo.



**Figura 2.4 - El momento del impacto en un atropello a un peatón**

### Impactos con el vehículo

Como regla general en un atropello a un peatón, hay tres subcategorías de contactos entre el peatón y el vehículo. El primer impacto se produce entre la pierna del peatón y el parachoques del vehículo. Esto es seguido de inmediato por un impacto con la parte final del capó contra el muslo del peatón y la región pélvica. Como resultado de estos dos impactos, principalmente el segundo, la parte superior del cuerpo y la cabeza comienzan a girar hacia delante y hacia abajo en dirección al vehículo, lo que desemboca en un tercer impacto, cuando el hombro del peatón y/o la cabeza golpea la parte superior del capó y, a menudo, el cristal del parabrisas.

En colisiones con altas o moderadas velocidades de impacto, la distancia que media entre el suelo a la altura del frontal del vehículo y el punto del vehículo donde golpea la cabeza recibe el nombre de Distancia Perimétrica de Envolvimiento (WAD, Wrap-Around Distance), y que es superior a la altura total del peatón.

Cronológicamente, hay un breve periodo de tiempo, sin tener en cuenta el diseño del frontal del vehículo que lo atropella, donde el peatón es “cogido” por el frontal del vehículo mientras se mueve en la dirección en la que el vehículo se estaba moviendo cuando golpea al peatón y acelera hasta la velocidad del vehículo o a una muy próxima a ella. Generalmente, si el peatón es transportado encima del capó del vehículo exhibirá algún movimiento relacionado con su componente de velocidad inicial.

### Impactos posteriores

Si el cuerpo es de alguna forma lanzado desde el capó al parabrisas, habrá alcanzado el mismo vector de velocidad que el vehículo que lo atropella. Si el cuerpo se mueve hacia el parabrisas, habrá alcanzado aproximadamente la misma velocidad que el vehículo e, inicialmente, el mismo vector velocidad. Si el cuerpo no es atrapado por el cristal del parabrisas, y el diseño convexo del mismo rechaza el cuerpo a un lado del vehículo y sale despedido, el cuerpo tendrá una dirección de salida diferente a la del vehículo en el momento de la separación, aunque tendrán probablemente la misma velocidad. Si el cuerpo es lanzado al parabrisas y por encima del techo, no tendrá probablemente la misma velocidad que la del vehículo.

Alternativamente, si el coche empieza a detenerse, generalmente como resultado de la aplicación de los frenos, el vehículo probablemente decelerará más deprisa que el cuerpo, mientras el cuerpo esta todavía en el aire o en el vehículo. El vehículo, asumiendo un valor de un coeficiente de rozamiento medio sobre la calzada de 0,69 decelerará a  $6,7 \text{ m/s}^2$ . El cuerpo está deslizando sobre la superficie del vehículo decelerando a través del capó a un coeficiente de rozamiento cercano a un valor de 0,3 o una proporción de deceleración de  $2,9 \text{ m/s}^2$ .

### 2.4.3 Movimiento del peatón sobre el suelo

El siguiente fenómeno experimentado por el peatón será una abrupta aceleración negativa cuando el cuerpo impacta en el suelo. El cuerpo puede, entonces, volver a volar brevemente, y de nuevo retorna al suelo y experimenta otra abrupta deceleración.

El cuerpo puede caerse o rodar alguna distancia en el suelo. Puede también deslizarse otra distancia. Cada tipo de movimiento y el grado de deceleración experimentado por el cuerpo durante ese movimiento es una función de la velocidad del cuerpo y el ángulo en el que es golpeado por primera vez el suelo como también el valor del coeficiente de rozamiento del cuerpo y la superficie del suelo (pej. una carretera de conglomerado con hielo) relativa al cuerpo o sus ropas.

El cuerpo humano en algunos casos, se detiene más rápido que el vehículo que se haya frenando a partir de su primer contacto. En este caso, el cuerpo podría quedarse enganchado bajo el frontal del vehículo en un impacto secundario y será arrastrado por el vehículo algunas distancias hasta que el coche alcanza su posición final.

**Las Posiciones finales (PF)** son las que adoptan los vehículos, personas y objetos cuando llegan a la inmovilidad después del evento.

La mayor parte de este apartado 2.4 ha sido extraído casi en su totalidad del artículo "La reconstrucción de accidentes. El atropello de peatones (1ª parte)". (*Campón Domínguez, J. A.*)

## 2.5 TIPOLOGÍAS DEL ATROPELLO

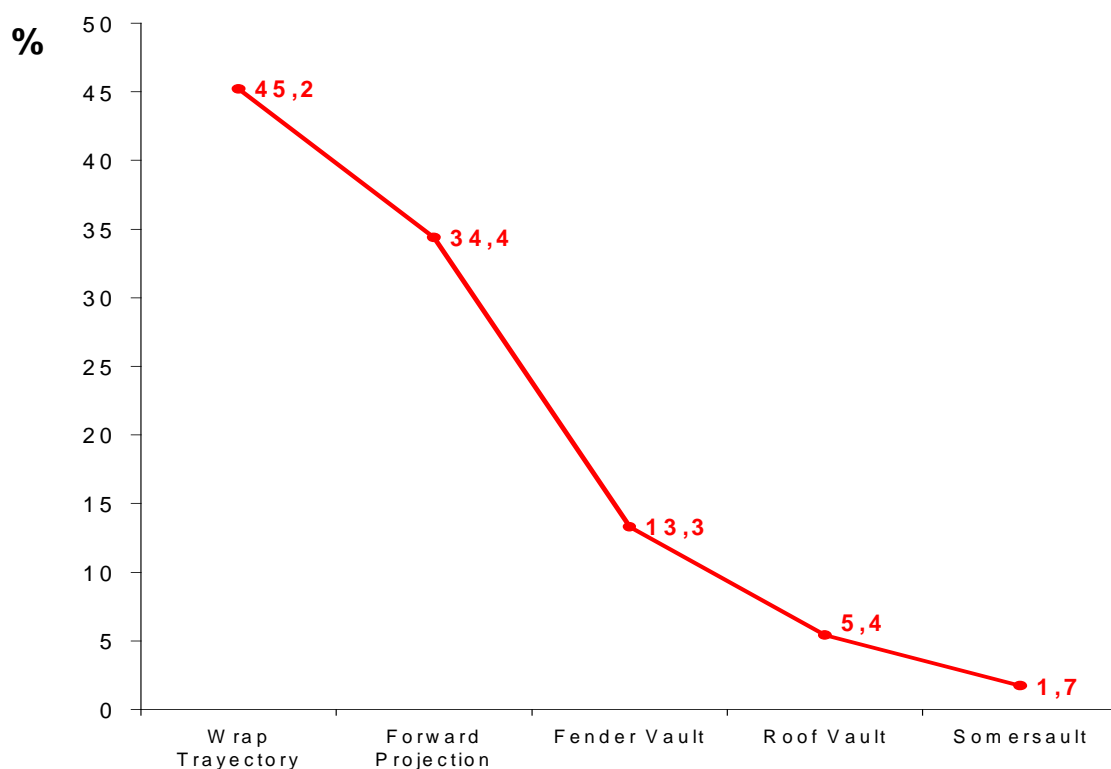
Puede que no sea demasiado arriesgado afirmar que todos los accidentes de tráfico son distintos, no hay dos similares, ya que el número de factores que intervienen en un accidente, hacen que sea casi imposible que se repitan en dos momentos diferentes. En el caso particular de los atropellos también podría afirmarse esto. Sin embargo, en los diferentes accidentes, siempre existen ciertos factores en común que posibilitan hacer una clasificación. Gracias a estas clasificaciones es posible mejorar el conocimiento que se tiene de los accidentes, y de esta forma poder abordar la investigación de otros accidentes de las mismas características con una mayor información sobre la velocidad a la que se ha producido, las lesiones que puede causar, etc.

Una de clasificaciones que existen en el estudio de los atropellos de peatones es la que hace referencia a los movimientos del cuerpo de la víctima sobre el vehículo y sobre el suelo, una vez producido el atropello. Estos movimientos, y por tanto también los atropellos, pueden clasificarse a partir de las siguientes cinco trayectorias (*Díaz López, I.*):

- ◆ Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory).
- ◆ Proyección hacia delante (forward projection).
- ◆ Volteo sobre la aleta (fender vault)
- ◆ Volteo sobre el techo (roof vault)
- ◆ Salto mortal (somersault)

Aunque la clasificación anterior no es exhaustiva, aproximadamente, el 80% de los casos de colisión frontal considerados pueden ser clasificados dentro de una de las cinco trayectorias básicas. Se ha observado que la trayectoria biodinámica postimpacto del peatón está influenciada por alguna de las variables de la colisión, como sería la geometría y configuración del vehículo y peatón, la velocidad de impacto del vehículo y la ausencia o presencia de maniobra de frenada del vehículo. De un total de 300 casos de colisión frontal considerados, 241 presentaban datos suficientes, y también podrían ser correctamente clasificados dentro de alguna de las cinco trayectorias biodinámicas. En la siguiente figura se muestran los porcentajes de distribución de casos identificados en las diferentes trayectorias.



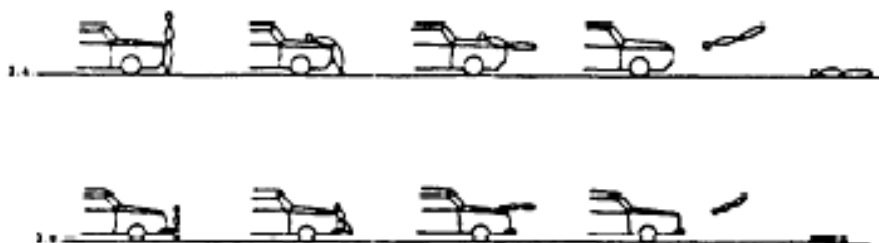


**Gráfico 2.9 – Porcentaje de cada tipo de trayectoria postcolisión posible seguidas por los peatones en casos de atropello**

En los siguientes cinco apartados se describen y se caracterizan las cinco trayectorias según *Haight y Eubanks*:

### 2.5.1 Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)

La más común de las categorías, la trayectoria de envolvimiento, generalmente implica un vehículo decelerando. En este escenario, el peatón es proyectado por encima del frontal del vehículo, con su torso superior en contacto con el capó y siendo lanzado hacia el parabrisas o, menos frecuentemente, fuera del vehículo.



**Figura 2.5 - Trayectoria de envolvimiento (Wrap Trajectory)**

La velocidad media de impacto para colisiones que tengan como patrón la trayectoria de envolvimiento es aproximadamente 30 km/h (18 mph). El contacto entre la cara/cabeza del peatón con el parabrisas no es generalmente observado en velocidades por debajo de 40 km/h (25 mph). Los peatones no son generalmente sobrepasados en los accidentes de esta categoría.

### 2.5.2 Proyección hacia delante (forward projection)

La proyección hacia delante es la segunda categoría de trayectoria más común en la que están implicados niños. El término es generalmente utilizado para definir una colisión donde el centro de masas del peatón está por debajo de borde anterior del capó del vehículo al impactar.

En una proyección hacia delante, el torso superior del peatón es acelerado rápidamente en la dirección a la que la fuerza de impacto es aplicada, proyectando el cuerpo delante del vehículo. El peatón es acelerado a la misma velocidad que tiene el vehículo que lo atropella y posteriormente, cuando el vehículo que lo golpea decelera, cae a la carretera y se mueve hasta la posición final. Las lesiones producidas por el contacto directo con el vehículo y aquellos que se derivan del contacto con la carretera no están, generalmente, en el mismo lado del cuerpo.

La proyección hacia delante se puede también observar cuando el cuerpo del peatón es cortado más que envuelto sobre el capó. El centro de masas del peatón esta por encima del borde anterior del capó, pero la energía generada por el impacto fue insuficiente para acelerar las piernas para que perdieran el contacto con la calzada. Las velocidades de impacto detectadas, generalmente, se encuentran por debajo de los 15 km/h (10mph) cuando ocurre esto.

Esta categoría de atropello usualmente implica que el vehículo no está frenando a fondo durante la secuencia del atropello o cuando la frenada no se produce hasta después del impacto. La intrusión puede ocurrir en este tipo de accidentes incluso a baja velocidad.

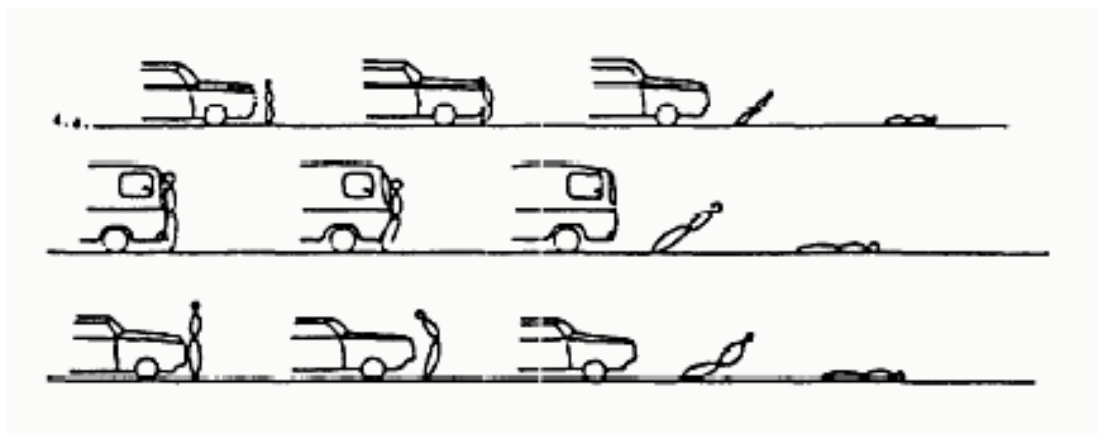


Figura 2.6 - Proyección hacia delante (Forward Projection)

La característica principal de este tipo de atropellos es que fundamentalmente sólo existe un único impacto del peatón con el vehículo, siendo típico:

- ♦ Cuando el vehículo que colisiona es un vehículo industrial y furgonetas, disponiendo su carrocería de un frontal aproximadamente vertical.
- ♦ Cuando un vehículo, tipo turismo o todoterreno, colisiona contra un niño, al disponer éste último morfológicamente una talla pequeña.
- ♦ Cuando el vehículo se encuentra en fase de aceleración en el instante del atropello, donde debido a la transferencia de pesos en este proceso, se produce una elevación de la carrocería sobre el eje delantero con respecto al eje trasero.

### 2.5.3 Trayectoria de volteo sobre la aleta (fender vault)

La categoría de trayectorias de volteo sobre la aleta se da tanto para vehículo frenados como aquellos que no lo están. El peatón es, generalmente, alcanzado por el vehículo y volteado sobre la aleta. La velocidad perpendicular del peatón o el diseño del vehículo normalmente influyen sobre el cuerpo del peatón para que salga por el lateral del vehículo.

Las velocidades medias en atropellos con volteos sobre la aleta están en torno a los 40 Km/h.

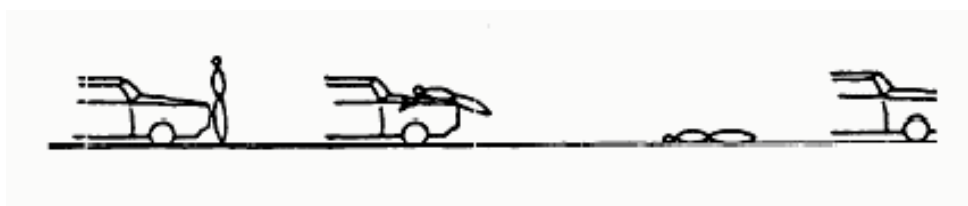
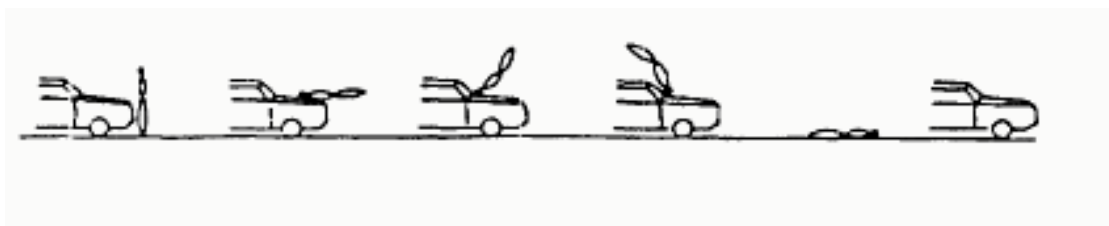


Figura 2.7 - Volteo sobre la aleta (Fender Vault)

### 2.5.4 Trayectoria de volteo sobre el techo (roof vault)

El volteo sobre el techo lo encontramos en aquellas situaciones en las que un peatón con un centro de masas más alto que el borde anterior del capó es lanzado al aire como resultado de la velocidad de impacto y/o el diseño del vehículo que es lo suficientemente alto para que el centro de masas del peatón sobrepase la línea del techo del vehículo.

Esta trayectoria es también común en los casos donde el vehículo está acelerando después del impacto o en aquellos supuestos que se producen a una alta velocidad de impacto donde el vehículo no se detiene hasta la fase post-impacto. En los trabajos publicados, los volteos sobre el techo no son comunes a velocidades por debajo de 32 km/h (20 mph). La velocidad aproximada para esta categoría está normalmente sobre 60 km/h.



**Figura 2.8 - Volteo sobre el techo (roof vault)**

### **2.5.5 Salto mortal (somersault)**

El Salto Mortal es la menos común de las trayectorias seguidas por un peatón. Su ocurrencia está documentada en un porcentaje menor del 2% de los atropellos a peatones.

Este tipo de trayectorias de los peatones es una extensión de la trayectoria de envolvimiento con la distinción debida a una, generalmente, mayor velocidad de impacto y/o a un impacto con una pequeña parte del cuerpo, donde la energía suministrada al peatón es suficiente para causarle un vuelo en el aire antes de impactar en la calzada. La velocidad media de impacto documentada para este tipo de atropellos está sobre 60 km/h.



**Figura 2.9 - Trayectoria de salto mortal (Somersault)**

Este apartado 2.5 ha sido extraído casi en su totalidad del artículo "La reconstrucción de accidentes. El atropello de peatones (2ª parte)". (Díaz López, V.)

## 2.6 CAUSAS DE LOS ATROPELLOS

Cuando se habla de circulación es posible distinguir tres elementos que siempre forman parte de ella, como son: la vía, el vehículo y la persona. Del mismo modo, estos elementos también están presentes en los accidentes de tráfico en general, y también en el caso de los atropellos. En ocasiones el principal elemento causante del accidente es uno de los tres factores, y en otras, se da una combinación de estos factores, lo que hace, como ya se ha comentado, que cada atropello sea único y distinto a los demás.

A continuación se indica, para cada uno de los tres elementos participantes en el tráfico, la forma en la que pueden ser la causa, o no, de un atropello.

La **vía** y su condición, muchas veces relacionada con las condiciones meteorológicas, puede ser un factor determinante en la mayoría de los casos de atropello, aunque más por la posibilidad de evitarlos, que por ser el elemento causante. Además de la separación física de la vía entre vehículos y peatones, en forma de calzadas y arcén, o en zonas urbanas como calzada y aceras, existen los denominados pasos de peatones, cuya función principal es señalar el paso más adecuado para atravesar la vía de un lado a otro. Los pasos de peatones se pueden clasificar en cuatro tipos [14] [15]:

- ◆ Cebra, que conceden prioridad permanente a los peatones que lo utilizan.
- ◆ Semaforizados, que establecen la prioridad de peatones o vehículos según las fases de su ciclo.
- ◆ A distinto nivel, que realizan a desnivel, deprimido o elevado, el cruce de la calzada. Hay dos tipos básicos: elevados o pasarelas y subterráneos
- ◆ Integrados

A pesar de que su función es la de facilitar el cruce de la vía a los peatones, una mala distribución espacial, colocados en zonas alejadas del tránsito de las personas o sin la señalización adecuada puede hacer que su utilidad se vea muy mermada o no cumplan su cometido. Con todo esto, deben considerarse los pasos de peatones, como elementos que evitan los accidentes, y únicamente en casos excepcionales pueden contribuir junto con otros factores a que se produzca un atropello.

El siguiente elemento considerado como parte de la circulación y posible factor determinante en un atropello es el **vehículo**. Todos los vehículos que circulan por las vías disponen de dos tipos de medidas de seguridad, más o menos sofisticadas, que pueden dividirse en dos categorías, las de seguridad activa o pasiva. Forman parte de

la seguridad activa de un vehículo todas aquellas medidas que evitan que se produzca un accidente, como son las imprescindibles en todo vehículo, como suspensión, frenos, dirección o alumbrado; y también las más actuales y sofisticadas como los frenos antibloqueo, el control de tracción, el control de estabilidad o como las diferentes ayudas a la frenada. Por otro lado, la seguridad pasiva engloba todas las medidas de seguridad que un vehículo incorpora y cuya función es la de evitar que los ocupantes de los vehículos y peatones, sufran heridas, o, reducir la gravedad en éstas una vez se produce el accidente. Entre estos elementos pueden destacarse el cinturón de seguridad, el airbag, el habitáculo de seguridad o los ideados específicamente para los casos de atropello, como el sistema pop-up o el diseño del frontal del vehículo. Estos últimos elementos se muestran en un punto posterior de este capítulo.

Queda claro que el vehículo, gracias a las medidas de seguridad que incorpora, no puede ser considerado como un elemento causante de los atropellos, sino al contrario, como ocurre con la vía, es un factor con una gran importancia a la hora de evitar los atropellos. Únicamente el vehículo puede ser considerado el causante de un accidente o un atropello, cuando éste se produce por el fallo o avería de uno de los sistemas de seguridad. Pero según las estadísticas esta circunstancia se produce en un número de casos muy pequeño. En las tablas siguientes se muestran los defectos observados en los vehículos implicados en accidentes con víctimas, durante 2004 en España, tanto en carretera como en zona urbana, teniendo en cuenta su antigüedad [9].

Antigüedad del vehículo												
Estado del vehículo	-1	1	2	3	4	5	6/7	8/10	11/15	+15	Sin especific.	TOTAL
Ningún defecto	4786	7539	6438	6418	6296	5763	8035	7846	11055	4238	3513	71927
Neumáticos muy desgastados	5	27	29	23	28	28	48	50	75	41	20	374
Pinchazo o reventón	9	15	19	18	19	21	24	39	49	18	16	247
Pérdida de rueda	0	2	1	1	3	5	3	2	7	5	2	31
Luces delanteras deficientes	2	4	3	4	2	2	1	0	5	1	8	32
Luces traseras deficientes	0	3	3	3	6	0	0	3	5	11	12	46
Frenos deficientes	0	2	4	1	4	4	4	4	8	8	6	45
Dirección rota o defectuosa	4	1	0	0	1	1	3	4	3	6	1	24
Sobrecargado	4	1	4	1	4	1	4	1	4	2	1	27
Carga más acondicionada	3	1	3	1	6	2	3	2	4	2	3	30
Otros defectos	13	20	30	14	24	18	21	31	43	39	44	297
Se ignora	57	78	70	60	67	66	87	99	171	85	308	1148
<b>TOTAL</b>	4883	7693	6604	6544	6460	5911	8233	8081	11429	4456	3934	74228

Tabla 2.14 – Distribución del número de accidentes en carretera según el estado del vehículo, en España (Año 2004)

Estado del vehículo	Antigüedad del vehículo										Sin especific.	TOTAL
	-1	1	2	3	4	5	6/7	8/10	11/15	+15		
Ningún defecto	3431	5590	4650	4870	5323	4294	5149	5059	6955	2565	29925	77811
Neumáticos muy desgastados	7	9	8	14	26	9	17	10	28	17	37	182
Pinchazo o reventón	1	4	6	3	3	3	6	2	6	1	8	43
Pérdida de rueda	1	1	1	0	0	0	0	0	0	2	1	6
Luces delanteras deficientes	2	2	4	7	0	0	0	1	3	3	11	33
Luces traseras deficientes	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	3	9
Frenos deficientes	2	4	8	6	10	2	1	5	9	6	28	81
Dirección rota o defectuosa	3	8	5	2	7	2	3	4	7	1	13	55
Sobrecargado	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	3	5
Carga más acondicionada	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	6
Otros defectos	56	72	53	73	75	48	74	71	110	56	188	876
Se ignora	537	964	800	883	846	692	878	772	1044	302	3527	11245
<b>TOTAL</b>	<b>4041</b>	<b>6655</b>	<b>5536</b>	<b>5860</b>	<b>6292</b>	<b>5051</b>	<b>6128</b>	<b>5925</b>	<b>8164</b>	<b>2955</b>	<b>33745</b>	<b>90352</b>

**Tabla 2.15 – Distribución del número de accidentes en zona urbana según el estado del vehículo, en España (Año 2004)**

De estos datos puede extraerse el siguiente dato, de los 74228 vehículos implicados en accidentes en carretera, 71927, es decir, el 96,9 %, no presentaba ningún defecto. Mientras que en zona urbana, los vehículos sin defectos implicados en accidentes con víctimas, son 77811 de los 79107 vehículos de los que se conocía si presentaban defectos o no, lo que supone el 98.4%.

Por esta razón, el vehículo debe considerarse en la gran mayoría de los casos un factor determinante para evitar un atropello, o cualquier otro accidente de tráfico, y no al contrario.

Una vez tratado la vía y el vehículo y su influencia en los accidentes de tráfico, parece obvio, que el principal responsable o causante de los atropellos, es el ser humano. Las



personas, o si se prefiere, el factor humano es determinante en la mayor parte de los accidentes de tráfico, siendo también el elemento causante de que se produzca. Se pueden distinguir dos tipos de individuos según sea su actividad, el conductor de un vehículo y el peatón.

No es aventurado afirmar que la gran mayoría de los accidentes de circulación son resultado directo de las infracciones realizadas por las personas, ya sean como conductores o peatones. Es posible destacar cuatro factores concurrentes en la mayoría de los accidentes de tráfico y que están directamente relacionados con el hombre como causa principal de los accidentes de tráfico.

- ♦ Velocidad
- ♦ Alcohol
- ♦ Distracciones
- ♦ Infracciones

El exceso de **velocidad** o la velocidad inadecuada, según datos del año 2006 [8], estuvo presente en el 15% de los accidentes con víctimas, aumentando hasta el 21% en los accidentes producidos en carretera. Si se consideran los accidentes con víctimas mortales durante ese año, el porcentaje de accidentes en los que la velocidad fue el factor determinante fue del 27%. En un más reciente estudio del RACE [16] sobre la velocidad en las zonas urbanas se indica que el 56% de los vehículos controlados superaban la velocidad máxima permitida en ciudad de 50km/h. Según las velocidades medias obtenidas, todos las clases de vehículos superaban la velocidad máxima establecida, lo que repercute en un mayor riesgo de producir un atropello y que éste tenga graves consecuencias para el peatón. Como indican los estudios, y la razón por la que la velocidad en ciudad está limitada a 50km/h, existe una correlación entre la velocidad del atropello y la probabilidad de sufrir heridas graves. En torno a 50km/h la probabilidad de sufrir una lesión grave se sitúa alrededor del 50%, aumentando hasta el 95% si la velocidad es de 60km/h (*Barrios*).

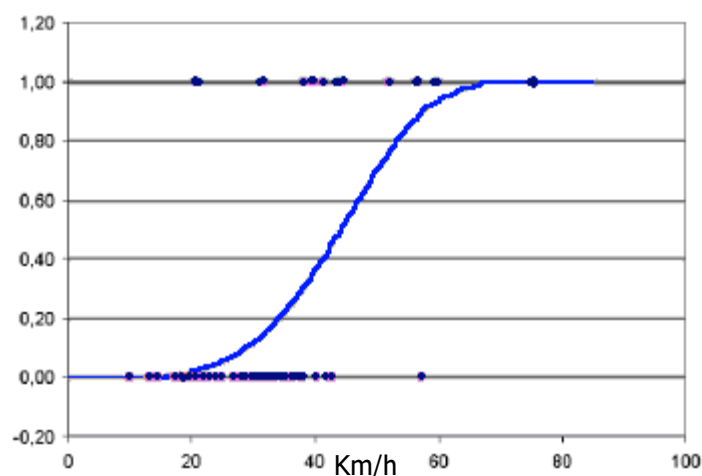


Gráfico 2.10 – Probabilidad de sufrir una herida grave en un atropello en función de la velocidad

Con respecto al **alcohol** como factor concurrente en los accidentes de tráfico, se puede destacar que cada año los controles de alcoholemia aumentan, mientras que el número de positivos disminuye [8]. A pesar de que existen datos sobre los controles realizados a las personas implicadas en accidentes de tráfico, sólo se destacan aquellos casos en los que se sobrepasaba los límites legales, pero no hay datos relevantes sobre los resultados en los que se comprobaba cierta ingesta de alcohol, aunque no se alcanzase los límites establecidos. Esto es un aspecto importante, ya que es sabido que cualquier consumo de alcohol afecta a las personas, en mayor o menor medida, y puede aumentar la probabilidad de sufrir o causar un accidente.

Las **distracciones**, tanto de conductores como de peatones, es otro de los factores concurrentes en una gran parte de los accidentes. Aunque existen un sinnúmero de posibles distracciones mientras se conduce o se camina, como puede ser conversar, admirar el paisaje, los anuncios publicitarios, manipular la radio o reproductores de audio, etc, uno de los más habituales es la utilización del móvil. De hecho esta conducta está penalizada cuando se está al mando de cualquier vehículo. Durante 2006 se produjeron 91385 denuncias a conductores por utilizar el teléfono móvil mientras conducían [8]. Aunque esta cifra es significativa, únicamente incluye el pequeño porcentaje de los infractores que han sido detectados por los agentes de tráfico en las carreteras. A esta cifra hay que sumar el número indeterminado de conductores que usan su teléfono en ciudad, pero que puede llegar a ser muy superior al de las infracciones en carretera. Las distracciones en ciudad pueden ser causa de accidentes, y por tanto el número de atropellos debido a esto puede ser elevado. Los peatones también son en muchas ocasiones causantes de accidentes debido a sus propias distracciones. De nuevo, el uso del teléfono móvil puede ser destacado. Los datos sobre las distracciones son concluyentes. En 2006, en el 36% de los accidentes la distracción fue la causa principal, siendo este porcentaje del 42% en los casos en carretera y del 31% en zona urbana.

Pero sin duda el factor que mayor importancia tiene como causa de los accidentes de tráfico son las **infracciones** de las normas de circulación. De hecho, puede considerarse dentro de este factor a los otros tres, velocidad, alcohol y distracciones. Si se respetasen las normas establecidas, una gran mayoría de los accidentes podrían evitarse. A pesar de esto, en las estadísticas se realiza una separación con el resto de factores y se habla de las infracciones como uno más. De nuevo según datos del 2006, la mayoría de accidentes fueron consecuencia directa de las distracciones [8]. Se estima que el 67% de los accidentes producidos fueron causados por infracciones, destacando en carretera el 58% y el 75% en zona urbana. Este último dato puede explicar en parte el mayor número de accidentes, sobre el total, que se produce en zonas urbanas respecto a los producidos en carretera.

Aunque tanto los conductores como los peatones cometen infracciones, estos últimos son el grupo más destacable, ya que los atropellos provocados por no respetar las normas, suelen tener peores consecuencias, provocando heridas de gravedad o la muerte. Es posible indicar las infracciones que cometieron los peatones, víctimas de atropellos, en España durante el año 2004 [9].

	En carretera	En zona urbana	En travesía	TOTAL
No respetar señal de semáforo	14	720	14	748
No utilizar paso de peatones	62	1844	47	1953
No respetar señal del agente	1	14	0	15
Irrumpir o cruzar antirreglamentariamente	697	1601	115	2413
Estar o marchar por calzada antirreglamentariamente	166	297	9	472
Estar o marchar por arcén antirreglamentariamente	37	56	2	95
Subir o bajar del vehículo antirreglamentariamente	9	26	0	35
Otras infracciones	62	553	6	621
Ninguna infracción	555	5054	160	5769
<b>TOTAL</b>	1603	10165	353	12121

**Tabla 2.16 - Infracciones cometidas por los peatones víctimas de atropellos, en España (Año 2004)**

De los datos es posible destacar varias ideas. Por un lado, se puede observar como en general, la infracción más común causante del atropello, es que el peatón cruza o irrumpe en la calzada de forma no reglamentaria, seguido de la no utilización de los pasos de peatones para cruzar la vía. La otra idea a destacar es que de los 12121 atropellos con víctimas contabilizados, en el 47,6% de los casos el peatón no cometió ninguna infracción, lo que lleva a pensar casi con toda seguridad que en esos casos la infracción la cometió el otro grupo humano, es decir, el conductor.

A partir de todos estos datos es posible extraer una conclusión importante. Los atropellos de peatones podrían evitarse, salvo en mínimas ocasiones, si el conductor y el peatón respetasen las normas.

## 2.7 MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN DE ATROPELLOS

Tal y como dice el título de este apartado, a la hora de afrontar los atropellos pueden tomarse medidas en dos direcciones diferentes, por un lado intentar prevenir los atropellos, y por otro, intentar que cuando estos no puedan ser evitados, el peatón pueda contar con cierto nivel de protección que haga que el daño provocado sea el menor posible. El atropello menos dañino para los peatones es el que no se produce, y por tanto, la mayoría de las medidas propuestas van encaminadas hacia este propósito. El grave problema que suponen los atropellos de peatones, como indican las cifras recogidas en puntos anteriores de este capítulo, requiere del esfuerzo de toda la sociedad al completo para que año tras año, las cifras de víctimas afectadas por los atropellos desciendan. Es necesario un compromiso general en todos los niveles sociales, desde los más altos como son las administraciones públicas, hasta el nivel más bajo representado por los ciudadanos, peatones y conductores, sin olvidar a los fabricantes de vehículos. A pesar de que únicamente en este documento se trata el tema referente a los atropellos, este esfuerzo colectivo es el mismo que el que la sociedad debe realizar para minimizar el número de afectados por los accidentes viales, sean del tipo que sea.

En esta parte del capítulo se indican brevemente algunas de las medidas que se han adoptado, que están siendo adoptadas y serán adoptadas en el futuro más inmediato, para prevenir los atropellos y proteger a los peatones en caso de sufrirlos.

De forma general, además de la clasificación básica de las medidas según sean de prevención o de protección, es posible diferenciar las medidas según sea su carácter o naturaleza, en los siguientes tipos:

- ◆ Medidas Legales
- ◆ Medidas en Infraestructuras
- ◆ Medidas de Educación, Divulgación y Concienciación
- ◆ Medidas Técnicas adoptadas en los vehículos

### 2.7.1 Medidas legales

Básicamente las medidas legales se pueden resumir en el cumplimiento de la actual legislación referente al tráfico. Se trata de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial, aprobada por el Real Decreto Legislativo 339/1990 el 2 de marzo, adaptado a la Ley Orgánica 15/2007 en noviembre de 2007 [17]. En ella se especifican las diferentes normas de circulación que afectan a todos los usuarios

de las vías, incluidos los peatones. Entre estas normas referentes a los peatones es posible destacar las siguientes:

♦ *Prioridad de paso*

- Los vehículos deben ceder el paso a los peatones:
  - en los pasos para peatones debidamente señalizados.
  - cuando el conductor del un vehículo al girar para entrar en una vía se encuentre con peatones cruzándola, aunque no exista paso para estos.
  - cuando el vehículo cruce un arcén por el que estén circulando peatones que no dispongan de zona peatonal.
  - cuando el vehículo circule por una zona peatonal.
  - a los peatones que vayan a subir o se hayan bajado de un vehículo de transporte colectivo de viajeros, en una parada señalizada.

♦ *Prohibiciones de adelantamientos, paradas y estacionamientos*

- Está prohibido adelantar en pasos para peatones señalizados.
- Está prohibido parar en los pasos para peatones.
- Está prohibido estacionar sobre las aceras, paseos y demás zonas destinadas al paso de peatones.

♦ *Obligaciones de los peatones*

- Están obligados a transitar por la zona peatonal, salvo, cuando ésta no exista o no sea practicable, en cuyo caso podrán hacerlo por el arcén o, en su defecto, por la calzada.
- Fuera de poblado, y en tramos de poblado incluidos en el desarrollo de una carretera que no dispongan de espacio especialmente reservado para peatones, como norma general, la circulación de los mismos se hará por la izquierda.
- Salvo en casos y condiciones especiales, queda prohibida la circulación de peatones por autopistas.

Además de todas estas normas, la legislación se complementa en toda una disposición de sanciones para cada tipo de infracción.

## 2.7.2 Medidas en infraestructuras

Las medidas de protección y prevención de los atropellos relacionadas con las infraestructuras que pueden verse en cualquier ciudad de todo el mundo pueden dividirse en dos categorías [14] [15]:

- ♦ Separación física entre los vehículos y los peatones, en forma de las distintas plataformas que conforman una vía, como son principalmente las aceras y arcones.
- ♦ El empleo de los llamados pasos de peatones, ya sean de cebra, semaforizados, a distinto nivel o integrados en reductores de velocidad (badenes o elevaciones de calzada)



**Figura 2.10 – Paso de peatones de distinto nivel (Pasarela elevada).** Situado en la localidad de Leganés

La localización de estos pasos de peatones tiene una gran importancia para evitar que los peatones crucen de forma indebida la calzada. Los pasos deben situarse cerca de zonas escolares o comerciales, y en general cuando la intensidad tanto de vehículos como de personas superen unos valores determinados. El Ayuntamiento de Madrid sitúa estos valores para localizar un determinado tipo de paso de peatones en cruce, con intensidades de 300 vehículos/hora y 300 peatones/hora, aunque estos valores parecen ser unos valores generales adoptados en la mayoría de las ciudades [15]. También se fijan las características que deben tener los diferentes tipos de pasos de peatones, entre los que destacan los pasos de cebra, por ser los más empleados. Están especificados con un mínimo de 4 metros de anchura, y en función de la longitud, emplear isletas, o medianas de refugio para separar el paso en dos o más tramos. Las



marcas viales deben ser únicamente de color blanco con una anchura y separación de 50 cm.

A pesar de que existe cierta regulación sobre las características que deben tener los pasos de peatones incluida en el Reglamento General de Circulación, en muchas ciudades españolas es posible observar diferentes tipos de estos pasos que no siguen un mismo patrón, como por ejemplo, incluyendo pintura de distintos colores, el empleo de badenes de diferentes formas y alturas, badenes prefabricados, bandas sonoras, señales luminosas, etc. Esto puede verse claramente en la Figura 2.11, donde destaca el uso ilegal de la pintura azul junto con la de color blanco. Por todo esto, la Comisión de Seguridad del Congreso ha aprobado en noviembre de 2008 una proposición no de ley para homologar los pasos de peatones de toda España [18].

Sin duda, medidas como éstas contribuyen a que se garantice una seguridad homogénea, y mayor a la vez, de todos los pasos de peatones.



**Figura 2.11 – Paso de peatones integrado. Compuesto por un paso de cebra (pintura blanca y azul) elevado por badén, bandas sonoras y refugio intermedio. Situado en la localidad de Leganés.**

### **2.7.3 Medidas en educación, divulgación y concienciación**

El tipo de medidas que pueden incluirse en este caso son muy variadas, ya que se trata sobre todo de formas de acercar a toda la sociedad el concepto de Seguridad Vial, para que en conjunto se logre un compromiso y una actitud que provoquen que descendan cada año el número de víctimas en accidentes de tráfico. El caso de la prevención de los atropellos, aunque no sea el que mayor repercusión tiene, no es un problema olvidado, todo lo contrario, ya que todo ciudadano es peatón en algún momento a lo largo de un día cualquiera.

Las medidas en educación son muy diversas, ya que a lo largo de la vida de cualquier persona se van ensañando conductas relacionadas con la seguridad vial, como por ejemplo, la forma adecuada de cruzar las calles, la manera correcta de viajar en un coche o el comportamiento que se debe llevar cuando se monta en bicicleta. Esta enseñanza continua por parte de la familia, según pasan los años se complementa con la educación en las escuelas, apoyadas en muchos casos por las administraciones locales o autonómicas, y también por entidades privadas. Además de todo esto, los medios de comunicación también participan en este proceso social de educación vial, que conlleva que en mayor o menor medida puedan prevenirse los accidentes de tráfico en general, y los atropellos en particular.

Una vez que la sociedad ya ha adquirido un nivel de educación vial, es necesario cada cierto tiempo medidas encaminadas a destacar y recordar la importancia que tiene el respeto de las normas viales para poder conseguir que los accidentes de circulación sigan una tendencia descendente año tras año. Este tipo de medidas de prevención pueden diferenciarse en dos formas, divulgación y concienciación. Para mostrar lo importante que es el respeto de las normas es necesaria la divulgación de los muchos datos que se recogen y analizan continuamente relacionados con la seguridad vial. Muchos de estos datos parten de estudios realizados por entidades públicas, como los que realiza y publica la Dirección General de Tráfico, o los que realizan entidades privadas como el RACE o RACC. Uno de estos informes es el "Estudio Europeo Sobre Pasos de Peatones" realizado en el marco de EuroTest, que analiza las cifras sobre atropellos en diez países europeos, comparando legislación y normativa de diseño de este tipo de infraestructuras.

Los datos recogidos en los diferentes informes y estudios, además de divulgarlos públicamente, las administraciones los analizan para crear estrategias que hagan posible una reducción del número de accidentes o de víctimas. Algunas de estas estrategias tienen como principal acción las campañas de concienciación que regularmente pueden verse en diferentes medios de comunicación, en las propias carreteras, o en cualquier otro espacio y lugar. Muchas de las campañas de concienciación son puestas en marcha por la DGT, aunque otras se impulsan desde ámbitos más locales. Un ejemplo de este tipo de campaña de concienciación es el que



se llevó a cabo el Ayuntamiento de Madrid en colaboración con el RACC, en 2008, utilizando como base el mencionado estudio de EuroTest, y cuyo lema era “¡Atención! Todos somos peatones”. En esta campaña, además de incluir los datos del estudio se destacaban algunas de las cifras más significativas, se recogían algunas recomendaciones tanto para la Administración, como para los peatones y conductores. [2] [5]



Figura 2.12 – Ejemplo de la campaña de concienciación en una calle de Madrid y su eslogan

Si existe una cualidad con la que pueda definirse al conjunto de peatones, es que son un grupo indisciplinado con respecto a las normas viales, puesto que comenten un gran número de infracciones. Sin duda, las medidas de divulgación junto con las de concienciación, ayudan a modificar esta actitud, favoreciendo el respeto por las normas, y haciendo que se consiga reducir la cifra de víctimas afectadas por los atropellos.

### 2.7.4 Medidas técnicas adoptadas en los vehículos

Los vehículos pueden equipar diferentes sistemas cuya finalidad es la de evitar el atropello, o bien, proteger al peatón en caso de que el accidente no pueda evitarse. Por tanto, puede hablarse de que existen medidas de seguridad activa y pasiva.

Empleando esta clasificación es posible indicar algunos de los sistemas que pueden adoptar los vehículos actuales para proteger al peatón en caso de atropello, o evitar que éste se produzca. (*Tinard*) (*Scherf*) [19] [20] [21] [22]

#### **Elementos de seguridad activa**

- ♦ **Cámaras de infrarrojos.** Algunos vehículos incorporan cámaras que permiten visualizar por delante de ellos a peatones que se encuentran en la oscuridad, a más distancia que el alcance de los faros del vehículo. También permiten visualizar a viandantes en condiciones de mínima visibilidad, como puede ser una densa niebla.
- ♦ **Sistemas de detección de obstáculos.** Se trata de sistemas basados en la tecnología de visión artificial, que son capaces de reconocer la naturaleza de diferentes objetos que pueden situarse delante del vehículo, incluidos los peatones. Mediante un sistema radar el vehículo es capaz de detectar y evaluar la amenaza que puede suponer el objeto. Estos sistemas pueden actuar de forma automática actuando sobre los frenos, consiguiendo una frenada más rápida y eficaz.

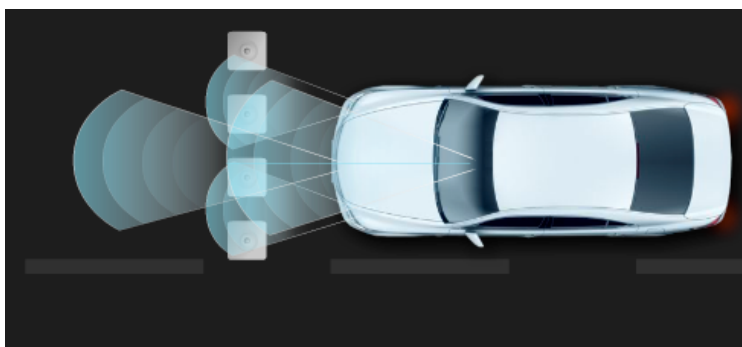


Figura 2.13 – Esquema de funcionamiento del sistema de detección de obstáculos de algunos vehículos

#### **Elementos de seguridad pasiva**

- ♦ **Diseño del frontal.** El diseño de los vehículos en su parte frontal ha cambiado en los últimos años buscando específicamente que sean menos agresivos con los peatones en caso de atropello. Por todo esto, las formas son más suavizadas, con menos aristas, y se han incluido parachoques menos rígidos y con materiales especialmente ideados para absorber gran parte de la energía del choque. Además de la geometría del frontal, la zona del capó también se diseña buscando mayor protección en caso de atropello. No sólo se busca que exista mayor distancia libre entre las zonas más duras del motor y la línea del

capó, sino que éste también es diseñado de forma expresa buscando producir el menor daño al peatón. Para conseguir esto, se han ideado diseños que cuentan con una distribución más homogénea en la rigidez, evitando de esta forma zonas del capó excesivamente rígidas, lo que provoca mayores daños cuando colisiona la cabeza u otra zona del cuerpo.

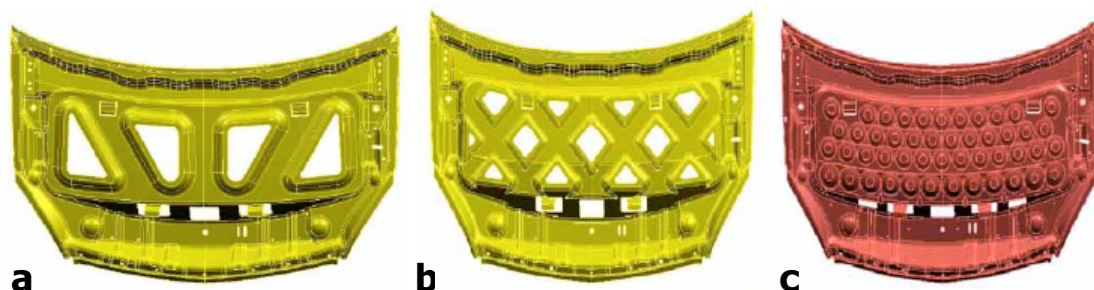


Figura 2.14 – Distintos diseños de capós. a) Diseño tradicional. b-c) Diseño actual con una estructura de rigidez homogénea

- ♦ **Airbags.** Además de los habituales airbags situados en el interior del vehículo, se están desarrollando nuevos modelos de airbags delanteros para ofrecer protección a los peatones en caso de atropello. Las zonas del vehículo que protegen son aquellas que entran en contacto más habitualmente con el peatón, es decir, el parachoques y el extremo del capó situado junto al parabrisas, además del pilar A de la estructura. El sistema de activación de los airbags del parachoques se basa en un sistema de detección de obstáculos, o peatones, ya que debe inflarse antes de que se produzca el contacto. El airbag que protege el pilar A y la parte alta del capó se activa a la vez que el del parachoques, aunque puede activarse a través de unos sensores de contacto.

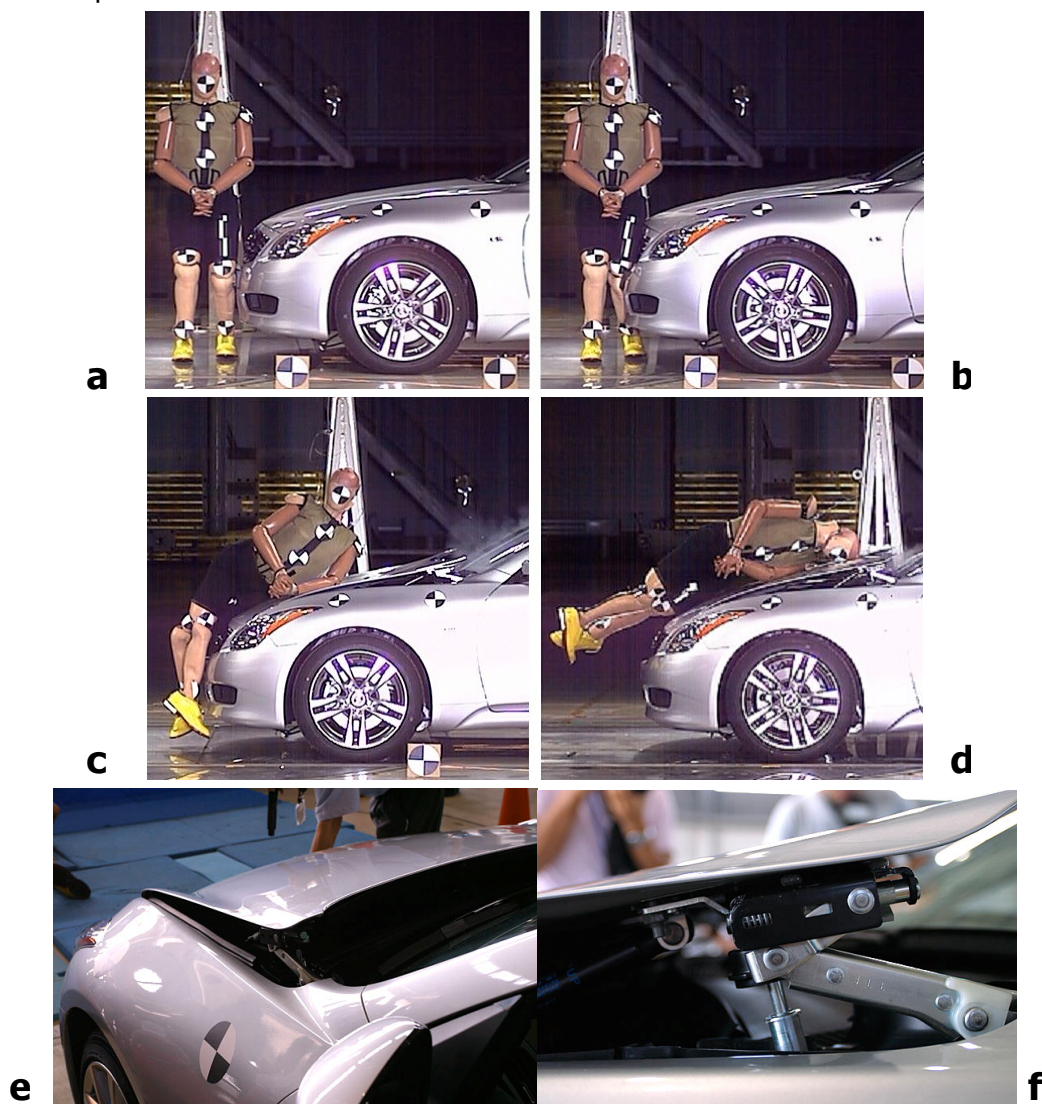


Figura 2.15 – Ejemplos de airbag situados en el frontal del vehículo para proteger al peatón en caso de atropello

- ♦ **Sistema pop-up.** Este sistema al activarse provoca que la parte del capó más alejada del frontal se eleve alrededor de 10 cm. sobre su posición normal, generando un espacio libre mayor entre el capó y las partes duras del vehículo, como pueden ser el motor u otros elementos estructurales. De esta forma proporciona protección en la zona de la cabeza, aunque también pueden verse menos dañadas otras zonas del cuerpo como es el tronco. Cuando se detecta la



colisión de un peatón a una determinada velocidad, unos sensores de contacto colocados en el frontal envían una señal a una unidad electrónica de control, que en función de la magnitud del impacto activa el sistema o no. Si el pop-up se activa, unos dispositivos pirotécnicos son disparados de forma que elevan las dos bisagras del capó, elevando éste y provocando que la cabeza del peatón al impactar con el vehículo sufra una aceleración menor.



**Figura 2.16 – Sistema pop-up. a-d) Secuencia de funcionamiento. e-f) Detalles del sistema**

Además de los sistemas específicos que equipan los vehículos no se pueden olvidar los sistemas comunes que comparten la mayoría de los vehículos y que deben pasar el proceso de homologación para poder ser comercializados. En la homologación se garantiza que todo vehículo cumpla unos requisitos de seguridad que impidan dañar en exceso al peatón en caso de atropello. Existen otros sistemas que no han sido mencionados porque no han sido especialmente ideados para evitar los atropellos, aunque sí permiten hacerlo en determinadas ocasiones, como son los sistemas electrónicos como el sistema de frenado antibloqueo (ABS) o el control electrónico de estabilidad (ESP).

## 3. LOS ENSAYOS DE ATROPELLO

### 3.1 INTRODUCCIÓN

Como ya se ha visto, los atropellos de peatones suponen uno de los grandes problemas relacionados con la seguridad vial. En los últimos años se han presentado muchas propuestas desde diferentes puntos de vista para conseguir que el número de peatones afectados por los atropellos vaya cada vez a menos. Como ya se ha visto, existen muchas medidas que pueden ser empleadas, como las destinadas a los vehículos, que están relacionadas con el tema principal sobre el que trata este Capítulo 3. Dentro de estas medidas técnicas de protección en los vehículos existen algunas que son de obligado cumplimiento en los vehículos para lograr su homologación, relacionadas con una mínima agresividad en el diseño de las formas y materiales de los frontales de los vehículos. Otras medidas son más tecnológicas y específicas, que sólo algunos vehículos utilizan, y que proveen al vehículo de una mayor protección al peatón atropellado como son los capós con el sistema pop-up o el airbag.

Tanto las medidas de protección específicas como las de mínima seguridad de los vehículos deben ser puestas a prueba en diferentes tests, a los que se les pueden denominar ensayos de atropello.

Es posible realizar una clasificación de los diferentes ensayos de atropello que existen, según los siguientes criterios:

- ♦ **Finalidad.** Algunos de los ensayos se realizan para poder homologar los vehículos, mientras que otros se llevan a cabo como parte de la investigación y el desarrollo de nuevos elementos de protección de los vehículos. Además, existen los realizados para informar a los futuros compradores de los vehículos sobre su nivel de protección hacia el peatón, o aquellos utilizados para comprobar que los diseños cumplen las especificaciones.
- ♦ **Realización.** En función de la finalidad de los ensayos de atropello, los pueden realizar los laboratorios de homologación, los fabricantes de los vehículos, los consorcios de valoración de vehículos nuevos (NCAP), etc.
- ♦ **Elementos empleados.** Básicamente existen dos tipos de ensayos de atropello, unos en los que se emplean impactadores que simulan las diferentes partes del cuerpo de una persona, y otros, en los que se emplean dispositivos

que representan y simulan el cuerpo completo del peatón, como es el caso de los crash test dummies.

- ♦ **Información obtenida.** La información que se obtiene de los ensayos puede ser muy variada, desde el daño que produce el parachoques sobre la pelvis de una persona, hasta la cinemática del atropello o las zonas de impacto del cuerpo humano. Puede ser información cuantitativa basada en resultados registrados por sensores, o cualitativa, basada en la visualización directa, en vídeo o fotografía del resultado del ensayo.
- ♦ **Método de ensayo.** Actualmente los ensayos de atropello se pueden realizar empleando sistemas reales en laboratorio o simulaciones por ordenador con modelos matemáticos.

En este capítulo del proyecto dedicado a los ensayos de atropello, se realiza un breve repaso sobre todos aquellos aspectos relacionados con este tipo de pruebas, incluyendo:

- ♦ La regulación actual existente, incluyendo los principales detalles.
- ♦ Las dos tipologías de ensayos que se realizan, tanto los basados en subsistemas como los que utilizan sistemas completos.
- ♦ Los crash test dummies.
- ♦ Los ensayos realizados por EuroNCAP.
- ♦ Los principales programas empleados en la simulación de ensayos de atropello.

## 3.2 REGULACIÓN DE LOS ENSAYOS DE ATROPELLO

Una sociedad global cada día más avanzada y tecnificada requiere que exista una regulación que garantice que productos y procedimientos cumplan una serie de requisitos de seguridad y calidad, de forma que se mejore y garantice el progreso. La normalización o regulación de los procesos contribuye a que estos sean cada vez mejores, más eficaces y que se realicen de forma más eficiente. En la actualidad es difícil encontrar cualquier bien o servicio, disponible en la sociedad, que no siga unas pautas, unas reglas y un proceso de homologación.

Existen normas que regulan los requisitos técnicos que debe cumplir un producto o, el nivel de agresividad para el medio ambiente de un proceso. Cualquier aspecto de la sociedad está regulado, así por ejemplo, existen normas que certifican que un juguete es apto para su homologación y comercialización, hasta normas que garantizan la salubridad de los alimentos que se consumen, pasando por normas que regulan aspectos más técnicos, como puede ser el suministro eléctrico o los vehículos que circulan por las carreteras.

En el caso de los vehículos automóviles, como cualquier otro bien comercializado debe pasar por una serie de pruebas de homologación que certifiquen que el vehículo cumple con todas las normas vigentes, en el país o región de comercialización, sobre seguridad, emisiones, etc. Del proceso de homologación se encargan diferentes laboratorios que cuentan con las instalaciones, personal y conocimientos necesarios para poder llevar a cabo todos los ensayos. En España es posible destacar dos laboratorios que realizan la homologación de vehículos, siguiendo las diferentes regulaciones, como son el INTA (Instituto de Tecnología Aeroespacial) y Appplus+ IDIADA [23] [24]

Las normas de homologación de los vehículos existentes en España son Directivas Europeas. En este apartado se indican aquellas Directivas Europeas que tratan sobre la seguridad de los vehículos, como son las que están relacionadas con la seguridad pasiva, y destacando aquellas que regulan la seguridad para los peatones, por ser el tema principal de este proyecto.

### 3.2.1 Directivas europeas

La última Directiva Europea sobre homologación de vehículos es la Directiva 2007/46/CE, por la que se crea un marco para la homologación de los vehículos de motor y de los remolques, sistemas, componentes y unidades técnicas independientes destinados a dichos vehículos. En ella se incluye una lista exhaustiva de características para la homologación de tipo CE de vehículos, distinguiendo por categorías y tipos, e

indicando la Directiva que debe cumplir cada subsistema del vehículo [25][26][27][28][29][30].

En ésta se especifican las dos Directivas que deben cumplir los vehículos automóviles relacionadas con las medidas de seguridad pasiva, que son puestas a prueba con los crash test. Son la Directiva 96/27/CE, sobre la protección de los ocupantes de los vehículos de motor en caso de colisión lateral. Y la Directiva 96/79/CE relativa a la protección de los ocupantes de los vehículos de motor en caso de colisión frontal, que ha sido actualizada por la Directiva 1999/98/CE.

Respecto a las Directivas referidas a la protección de peatones únicamente hay dos, la Directiva 2003/102/CE y la Directiva 2005/66/CE. Esta última se limita a la homologación de todos aquellos vehículos que equipan sistemas auxiliares de protección delantera, como las llamadas "defensas" en los vehículos todoterreno. Sin embargo la Directiva 2003/102/CE es de obligado cumplimiento para la homologación de todo vehículo automóvil comercializado en Europa, además de ser la regulación cuyo fin es la protección de los peatones y otros usuarios vulnerables de la vía pública en caso de colisión con un vehículo de motor. Por este motivo, en el siguiente punto se describen los aspectos más importantes de esta Directiva Europea.

### **3.2.1.1 Directiva 2003/102/CE**

El título completo es:

*"Directiva 2003/102/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 17 de noviembre de 2003 relativa a la protección de los peatones y otros usuarios vulnerables de la vía pública antes y en caso de colisión con un vehículo de motor y por la que se modifica la Directiva 70/156/CEE del Consejo"*

Tiene por objeto reducir las lesiones de los peatones y otros usuarios vulnerables de la vía pública, víctimas de impactos de las superficies delanteras de los vehículos de hasta 8 plazas y de menos de 2,5 toneladas. Todo vehículo que no cumpla esta Directiva será rechazado para su homologación.

Cuentan con un apoyo general las recomendaciones del Comité europeo para la mejora de la seguridad de los vehículos (European Enhanced Vehicle-Safety Committee o EEVC) de junio de 1999, que proponen requisitos de comportamiento para las estructuras delanteras de determinadas categorías de vehículos de motor con el fin de reducir su agresividad. La presente Directiva se basa en los ensayos y los valores límite recomendados por el EEVC. Todos son ensayos de laboratorio en los que se emplean los llamados impactadores, que son descritos en un apartado posterior de este capítulo.

Los ensayos a realizar son los siguientes, que se dividen en dos fases:



## **Fase 1**

- ♦ Colisión pierna-parachoques. Se requiere la realización de uno de estos dos ensayos:
  - Colisión parte inferior de la pierna-parachoques: el ensayo se realiza a velocidades de impacto de 40 km/h. El ángulo máximo de flexión dinámica de la rodilla no deberá sobrepasar los 21,0°, el desplazamiento máximo de rotura dinámica de la rodilla no superará los 6,0 mm y la aceleración medida en el extremo superior de la tibia no excederá de 200 g.
  - Colisión parte superior de la pierna-parachoques: el ensayo se realiza a velocidades de impacto de 40 km/h. La suma instantánea de las fuerzas de impacto por unidad de tiempo no excederá de 7,5 kN y el momento flector del impactador no excederá los 510 Nm.
- ♦ Colisión cabeza de niño o cabeza de adulto de pequeño tamaño-parte superior del capó: el ensayo se realiza a velocidades de impacto de 35 km/h utilizando un impactador de ensayo de 3,5 kg. La norma de referencia en el ensayo de comportamiento de la cabeza (NCC) no excederá de 1000 en 2/3 de la zona de ensayo del capó, ni de 2000 en el caso del 1/3 restante de la zona de ensayo del capó.

## **Fase 2**

- ♦ Colisión pierna-parachoques. Se requiere la realización de uno de estos dos ensayos:
  - Colisión parte inferior de la pierna-parachoques: el ensayo se realiza a velocidades de impacto de 40 km/h. El ángulo máximo de flexión dinámica de la rodilla no deberá sobrepasar los 15,0°, el desplazamiento máximo de rotura dinámica de la rodilla no superará los 6,0 mm y la aceleración medida en el extremo superior de la tibia no excederá de 150 g.
  - Colisión parte superior de la pierna-parachoques: el ensayo se realiza a velocidades de impacto de 40 km/h. La suma instantánea de las fuerzas de impacto por unidad de tiempo no excederá de 5,0 kN y el momento flector del impactador no excederá los 300 Nm.
- ♦ Colisión cabeza de niño-parte superior del capó: el ensayo se realiza a velocidades de impacto de 40 km/h utilizando un impactador de ensayo de 2,5

kg. La NCC no excederá de 1 000 para la totalidad de la zona de ensayo del capó.

- ♦ Colisión parte superior de la pierna-borde delantero del capó: el ensayo se realiza a velocidades de impacto de hasta 40 km/h. La suma instantánea de las fuerzas de impacto por unidad de tiempo no excederá de 5,0 kN y el momento flector del impactador no excederá los 300 Nm.
- ♦ Colisión cabeza de adulto-parte superior del capó: el ensayo se realiza a velocidades de impacto de 40 km/h utilizando un impactador de ensayo de 4,8 kg. La NCC no excederá de 1000 para la totalidad de la zona de ensayo del capó.

En el momento de la aprobación de esta Directiva, la Fase 2 de los ensayos quedaba supeditada a la viabilidad técnica de alcanzar los objetivos marcados. Hasta el momento de la redacción de este Proyecto Fin de Carrera, varios estudios independientes, incluidos el de algunos fabricantes de automóviles, asociaciones de fabricantes, y otros organismos responsables del transporte, han expresado la inviabilidad de la Fase 2 de la Directiva, tanto con respecto a los resultados de los ensayos como los plazos de tiempo. Ante esta situación se ha planteado la posibilidad de crear un Reglamento que sustituya a las Directivas 2003/102/CE y 2005/66/CE. Actualmente existe únicamente una Propuesta de Reglamento, que si se aprueba supondrá la derogación de las dos Directivas referentes a las medidas de protección para los peatones. La propuesta ya ha sido presentada y aprobada por el Comité Económico y Social Europeo, y se espera que en breve el Reglamento propuesto sea aprobado[31].

A pesar de que la Directiva está cerca de su derogación, por ser ésta la actualmente vigente se señalan a continuación los detalles técnicos de los ensayos que son expuestos en las prescripciones técnicas de la Directiva 2003/102/CE [32].

Antes de describir detalladamente los ensayos de la Directiva es necesario introducir el organismo que propuso estos ensayos, el EEVC, mencionado ya anteriormente.

#### **3.2.1.1.1 EEVC**

El EEVC (European Enhanced Vehicle-safety Committee) o Comité europeo para la mejora de la seguridad de los vehículos, nace en 1970 como respuesta a la iniciativa del Departamento de Transportes de Estados Unidos de crear un programa internacional de seguridad experimental de los vehículos [33]. El EEVC está compuesto por representantes de varias naciones europeas, que realizan trabajos de investigación en un gran número de áreas de trabajo de la seguridad del automóvil. De cada área de

la seguridad se encarga un grupo de trabajo, del cual forman parte diferentes expertos de los países representados en el EEVC. Los grupos de trabajo, WG, actuales y su área de trabajo son los siguientes:

- ◆ WG12, Crash Test Dummies
- ◆ WG13, Impacto Lateral
- ◆ WG14, Empotramiento (actualmente inactivo)
- ◆ WG15, Compatibilidad e Impacto Frontal
- ◆ WG18, Seguridad Infantil
- ◆ WG19, Interacción Primaria y Secundaria
- ◆ WG20, Impacto Trasero
- ◆ WG21, Estudio de Accidentes
- ◆ WG22, Ensayos Virtuales
- ◆ WG17, Peatones. Que engloba los anteriores WG1 y WG10

Aunque podría pensarse lo contrario, el EEVC no crea Normas o Regulaciones, sino que se lleva a cabo sus investigaciones y es a partir de éstas cuando el EEVC puede hacer propuestas a los organismos de regulación, como por ejemplo al Parlamento Europeo, y son estos los que toman la decisión de adoptar la propuesta o desarrollarla. El EEVC puede colaborar con el organismo de regulación si así se solicita, pero en ningún caso el EEVC llega a ser parte formal en el proceso de reglamentación.

El mejor ejemplo de esto es que el Grupo de Trabajo 17 (WG17), encargado del estudio de la seguridad para los peatones, es el que ha propuesto los actuales ensayos de homologación recogidos en la Directiva Europea 2003/102/CE [34].

### **3.2.1.1.2 Prescripciones Técnicas de la Directiva 2003/102/CE**

Únicamente de incluyen aquellas que sean más importantes o significativas. Los detalles técnicos de los impactadores empleados en cada ensayo no se incluyen, puesto que han sido tratados en un apartado independiente posterior.

#### **Condiciones generales aplicables**

El vehículo estará en disposición normal de circulación, bien fijo sobre soportes elevados o en estado estacionario en una superficie plana con el freno de mano echado.

***Línea de referencia superior del parachoques:*** extremo superior de los puntos de contacto significativo entre el parachoques y un peatón. Se define como el trazo geométrico que forman los puntos superiores de contacto entre una regla de 700 mm de longitud y el parachoques, cuando la regla, mantenida en paralelo al plano vertical longitudinal del vehículo e inclinada 20° hacia atrás, pasa por la parte delantera del vehículo manteniéndose en contacto con el suelo y con la superficie del parachoques

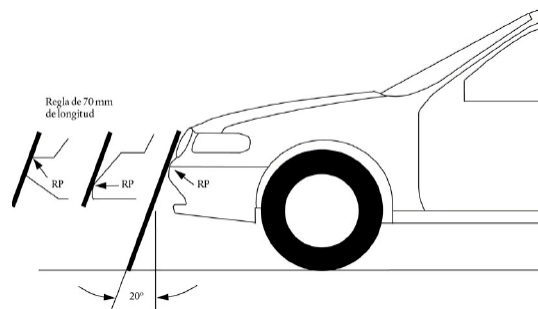


Figura 3.1 - Determinación de la línea de referencia superior del parachoques

**Línea de referencia inferior del parachoques:** extremo inferior respecto a los puntos de contacto significativos entre el parachoques y un peatón. Se define como el trazo geométrico que forman los puntos inferiores de contacto entre una regla de 700 mm de longitud y el parachoques cuando la regla, mantenida en paralelo al plano vertical longitudinal del vehículo e inclinada  $25^\circ$  hacia delante, pasa por la parte delantera del vehículo manteniéndose en contacto con el suelo y con la superficie del parachoques

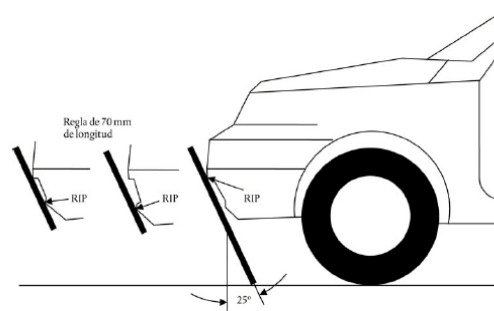


Figura 3.2 – Determinación de la línea de referencia inferior del parachoques

**Ángulo del parachoques:** punto de contacto del vehículo con un plano vertical que forma un ángulo de  $60^\circ$  con el plano vertical longitudinal del vehículo y es tangencial a la superficie exterior del parachoques

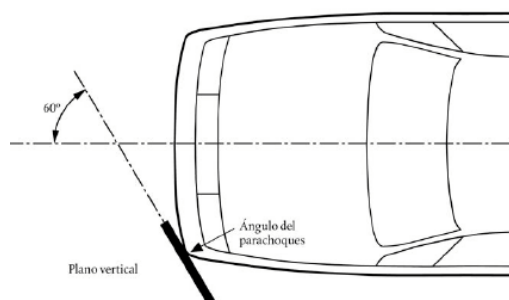


Figura 3.3 – Determinación del ángulo del parachoques

**Distancia perimétrica de 1 000 mm:** trazo geométrico descrito en la superficie superior delantera por el extremo de una cinta métrica flexible de 1 000 mm colocada en un plano vertical longitudinal del vehículo de manera que pase por la parte delantera del capó y el parachoques. La cinta métrica se mantendrá tensa durante la operación, manteniendo un extremo en contacto con el suelo en la vertical de la cara delantera del parachoques y el otro extremo en contacto con la superficie superior delantera. El vehículo deberá encontrarse en disposición normal de circulación.

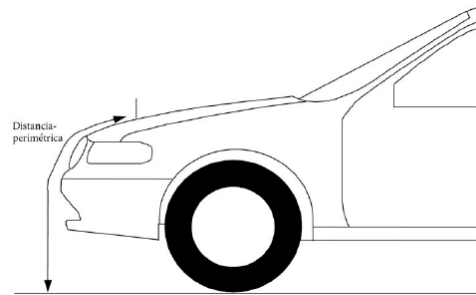


Figura 3.4 – Determinación de la distancia perimétrica

**Línea de referencia del borde delantero del capó:** trazo geométrico que forman los puntos de contacto entre una regla de 1 000 mm de longitud y la superficie delantera del capó cuando la regla, mantenida en paralelo al plano vertical longitudinal del vehículo e inclinada 50° hacia atrás y con el extremo inferior a 600 mm del suelo, pasa por el borde delantero del capó manteniéndose en contacto con él.

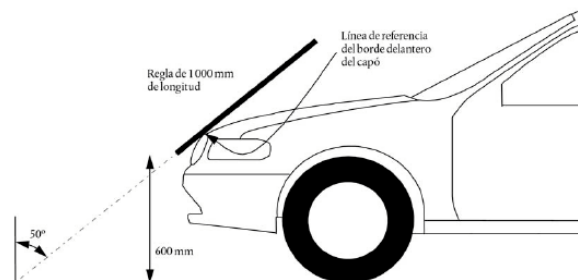
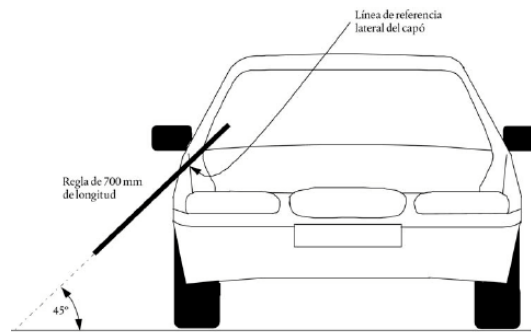


Figura 3.5 – Determinación de la línea de referencia del borde delantero del capó

**Línea de referencia lateral del capó:** trazo geométrico que forman los puntos de contacto superiores entre una regla de 700 mm de longitud y el lado de un capó, cuando la regla, mantenida en paralelo al plano vertical lateral del vehículo e inclinada 45° hacia la parte interior del vehículo, pasa por el lado de la superficie superior delantera y se mantiene en contacto con la superficie de la carrocería.



**Figura 3.6 – Determinación de la línea de referencia lateral del capó**

### **3.2.1.1.2.1 Ensayos pierna (tibia)-parachoques**

Para los ensayos del parachoques, el impactador simulador de pierna (tibia) se encontrará en situación de «vuelo libre» en el momento del impacto.

El impactador podrá impulsarse con un sistema de propulsión de aire, de resorte o hidráulico, o por cualquier otro método que garantice los mismos resultados.

Se realizará un mínimo de tres ensayos pierna-parachoques, uno con cada tercio del parachoques (tercio central y tercios exteriores), en las posiciones consideradas más susceptibles de causar lesiones. Los puntos de ensayo seleccionados estarán separados por una distancia mínima de 132 mm y se situarán entre los ángulos definidos del parachoques, como mínimo a 66 mm de ellos. Estas distancias mínimas se medirán con una cinta métrica flexible tensada a lo largo de la superficie exterior del vehículo. En el informe de los ensayos se indicarán los puntos ensayados por los laboratorios.

El impactador simulador de miembro inferior constará de dos segmentos rígidos recubiertos de espuma, que representarán el fémur (muslo) y la tibia (pierna), unidos por una simulación de articulación de rodilla deformable.

Los transductores se montarán de forma que midan el ángulo de flexión de la rodilla y el desplazamiento de rotura de la misma. En el lado no impactado de la tibia se fijará un acelerómetro uniaxial, próximo a la articulación de la rodilla, con su eje sensible orientado hacia el punto de impacto.

Los valores de respuesta CAC, de acuerdo con la norma ISO 6487 de 2000, serán de 50° para el ángulo de flexión de la rodilla, 10 mm para el desplazamiento de rotura y 500 g para la aceleración. Ello no supone que el propio impactador tenga que poder alcanzar físicamente ese ángulo de flexión o ese desplazamiento.

La dirección del vector de velocidad se situará en el plano horizontal y será paralela al plano vertical longitudinal del vehículo. El margen de tolerancia de la dirección del

vector de velocidad en el plano horizontal y en el plano vertical longitudinal será de  $\pm 2^\circ$  en el momento del primer contacto.

El eje del impactador será perpendicular al plano horizontal con un margen de tolerancia de  $\pm 2^\circ$  en el plano lateral y longitudinal. Los planos horizontal, longitudinal y lateral serán ortogonales entre sí

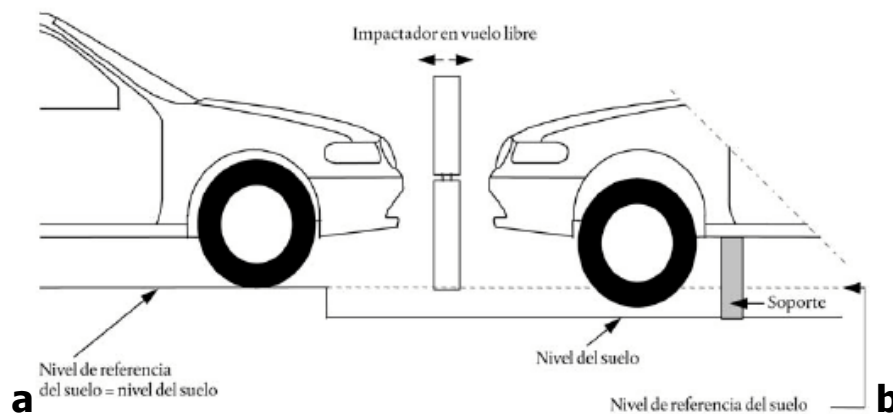
En el momento del primer contacto con el parachoques, la base del impactador estará al nivel de referencia del suelo, con un margen de tolerancia de  $\pm 10$  mm.

Las masas totales del fémur y la tibia serán de  $8,6 \pm 0,1$  kg y  $4,8 \pm 0,1$  kg, respectivamente, y la masa total del impactador será de  $13,4 \pm 0,2$  kg.

Los centros de gravedad del fémur y la tibia estarán respectivamente a  $217 \pm 10$  mm y  $233 \pm 10$  mm del centro de la rodilla.

Los momentos de inercia del fémur y la tibia, sobre ejes horizontales que crucen los centros de gravedad respectivos y perpendiculares a la dirección del impacto, serán respectivamente de  $0,127 \pm 0,010$  kgm<sup>2</sup> y  $0,120 \pm 0,010$  kgm<sup>2</sup>.

La velocidad de impacto del impactador al golpear el parachoques será de  $11,1 \pm 0,2$  m/s.



**Figura 3.7 – Ensayos miembro inferior-parachoques. a) Con vehículo completo en disposición normal de circulación. b) Con vehículo completo o subsistema montado sobre soportes**

### **3.2.1.1.2.2 Ensayos muslo-parachoques**

El impactador simulador de muslo para el ensayo con el parachoques se montará en el sistema de propulsión mediante una junta limitadora de la torsión que evite que el sistema de guía resulte dañado por la aplicación de cargas pesadas fuera de eje. El sistema de guía estará equipado de guías de baja fricción, insensibles a las cargas fuera de eje, que permitan al impactador moverse sólo en la dirección de impacto especificada cuando este entre en contacto con el vehículo. Las guías deberán evitar movimientos en otras direcciones, incluida la rotación sobre cualquier eje.

El impactador podrá impulsarse con un sistema de propulsión de aire, de resorte o hidráulico, o por cualquier otro método que garantice los mismos resultados.

El impactador simulador de muslo deberá ser rígido, tener recubierto de espuma el lado del impacto y tener una longitud de  $350 \pm 5$  mm.

Se instalarán dos transductores de carga, para medir por separado las fuerzas aplicadas, a cada extremo del impactador, y extensímetros, para medir los momentos de flexión, en el centro del impactador y en ambas caras a 50 mm de la línea central.

El valor CFC de la respuesta de los instrumentos, definido en la norma ISO 6487 de 2000, será de 180 para todos los transductores. Los valores CAC, definidos en la norma ISO 6487 de 2000, serán de 10 kN para los transductores de fuerza y 1000 Nm para las mediciones de los momentos de flexión.

La dirección del impacto será paralela al eje longitudinal del vehículo y el eje del simulador estará en posición vertical en el momento del primer contacto. El margen de tolerancia de estas indicaciones será de  $\pm 2^\circ$ . En el momento del primer contacto, la línea central del impactador deberá coincidir con un punto equidistante entre las líneas de referencia superior e inferior del parachoques, con un margen de tolerancia de  $\pm 10$  mm, y lateralmente con el lugar de impacto elegido, también con un margen de tolerancia de  $\pm 10$  mm.

La masa total del impactador simulador de muslo, incluidos los elementos de propulsión y guía que formen parte del mismo durante el impacto, será de  $9,5 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$ .

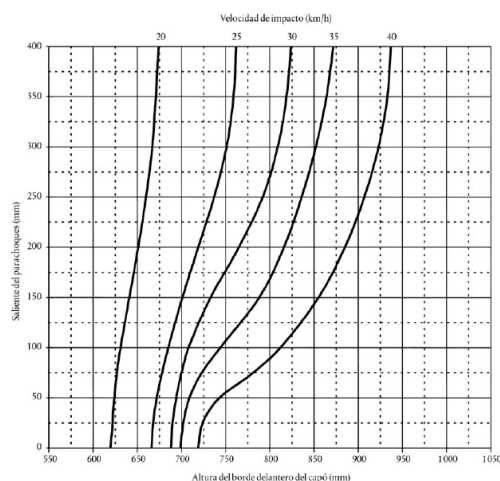
La velocidad del impactador al golpear el parachoques será de  $11,1 \pm 0,2 \text{ m/s}$ .



### 3.2.1.1.2.3 Ensayos muslo-borde delantero del capó

Se realizará un mínimo de tres ensayos muslo-borde delantero del capó, uno con cada tercio del borde delantero del capó (tercio central y tercios exteriores), en las posiciones consideradas más susceptibles de causar lesiones. No obstante, el punto de ensayo de cada tercio se seleccionará, siempre que sea posible, de forma que la energía cinética de impacto requerida, sea superior a 200 J. Los puntos de ensayo seleccionados estarán separados por una distancia mínima de 150 mm y se situarán entre los puntos de referencia angulares, como mínimo a 75 mm de ellos. Estas distancias mínimas se medirán con una cinta métrica flexible tensada a lo largo de la superficie exterior del vehículo. En el informe de los ensayos se indicarán los puntos ensayados por los laboratorios.

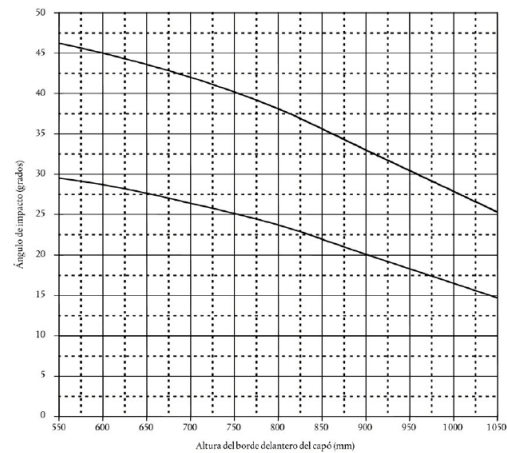
La masa del impactador dependerá de la forma general de la parte delantera del vehículo y se determinará de acuerdo con la figura siguiente.



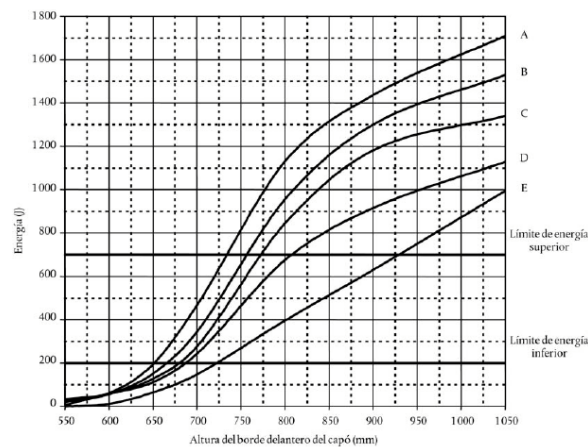
**Gráfico 3.1 - Velocidad de los ensayos muslo-borde delantero del capó en función de la forma del vehículo**

El margen de tolerancia de la velocidad de impacto y de la dirección de impacto será de  $\pm 2\%$ . Al calcular la velocidad de impacto a partir de las mediciones realizadas antes del primer contacto, deberá tenerse en cuenta el efecto de la fuerza de gravedad. El margen de tolerancia en la precisión de la medición de la masa del impactador deberá ser inferior a  $1\%$ , y si el valor medido difiere del requerido, se compensará ajustando la velocidad requerida.

Deberá determinarse la velocidad y la dirección de impacto en relación con los valores de la altura del borde delantero del capó y del saliente del parachoques establecidos a partir de las figuras.



**Gráfico 3.2 - Ángulo de los ensayos muslo-borde delantero del capó en función de la forma del vehículo**



**Gráfico 3.3 - Energía cinética de los ensayos muslo-borde delantero del capó en función de la forma del vehículo**

La masa total del impactador simulador de muslo incluirá los elementos de propulsión y guía que formen parte del mismo durante el impacto, incluidos los pesos adicionales. La masa del impactador se calculará mediante la fórmula:

$$M = 2 \cdot E / V^2 \quad \text{Ecuación 3.1}$$

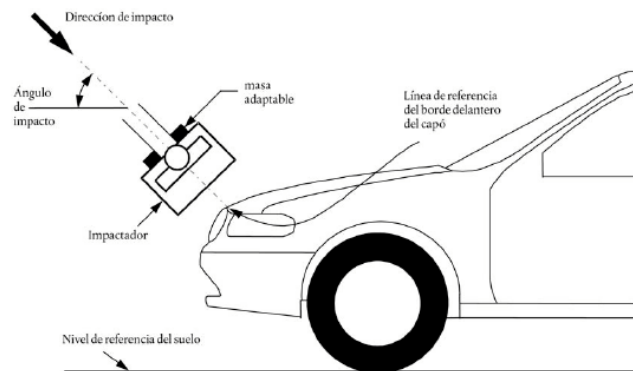
donde:

M = Masa [kg]

E = Energía del impacto [J]

V = Velocidad [m/s]

Ensayos muslo-borde delantero del capó

**Figura 3.8 – Ensayos muslo-borde delantero del capó**

#### **3.2.1.1.2.4 Ensayos de cabeza de adulto-parabrisas**

En el ensayo con el parabrisas, en el momento del impacto el impactador simulador de cabeza se encontrará en situación de «vuelo libre». El impactador quedará en vuelo libre a una distancia del vehículo suficiente para que no influya en los resultados del ensayo el contacto del impactador, tras rebotar, con el sistema de propulsión.

El impactador podrá impulsarse con un sistema de propulsión de aire, de resorte o hidráulico, o por cualquier otro método que garantice los mismos resultados.

Los ensayos del impactador simulador de cabeza de adulto se realizarán contra el parabrisas. Se realizará un mínimo de cinco ensayos con el impactador simulador de cabeza en las posiciones consideradas más susceptibles de causar lesiones.

Los puntos seleccionados para el ensayo del impactador simulador de cabeza contra el parabrisas deberán estar separados por una distancia mínima de 165 mm, y situarse a un mínimo de 82,5 mm de los límites del parabrisas, y un mínimo de 82,5 mm por delante de la línea de referencia trasera del parabrisas.

El impactador simulador de cabeza de adulto será una esfera rígida con piel. Tendrá un diámetro de  $165 \pm 1$  mm. Su masa total, incluyendo los instrumentos, será de  $4,8 \pm 0,1$  kg.

En el centro de la esfera se montará un acelerómetro triaxial (o tres uniaxiales).

El valor CFC de la respuesta de los instrumentos, definido en la norma ISO 6487 de 2000, será de 1 000. El valor CFC de la respuesta, definido en la norma ISO 6487 de 2000, será de 500 g para la aceleración.

La velocidad de impacto del impactador al golpear el parabrisas será de  $9,7 \pm 0,2$  m/s.

El impactador simulador de cabeza de adulto consistirá en una esfera de aluminio de construcción homogénea.

Al menos la mitad de la esfera estará recubierta de una piel sintética de vinilo de 13,9  $\pm$  0,5 mm de grosor.

#### **3.2.1.1.2.5 Ensayos de cabeza de niño y adulto-parte superior del capó**

En los ensayos con la parte superior del capó, en el momento del impacto los impactadores simuladores de cabeza se encontrarán en situación de «vuelo libre».

Los impactadores podrán impulsarse mediante un sistema de propulsión de aire, muelle o hidráulico, o por cualquier otro método que garantice los mismos resultados.

Los ensayos con el impactador simulador de cabeza se realizarán con la parte superior del capó. Se realizará un mínimo de nueve ensayos con cada impactador (tres con cada uno de los tercios central y exteriores de las secciones delantera y trasera de la parte superior del capó), en las posiciones consideradas más susceptibles de causar lesiones.

Los puntos seleccionados para el ensayo con el impactador simulador de cabeza de adulto deberán estar separados por una distancia mínima de 165 mm, y situarse a un mínimo de 82,5 mm de las líneas de referencia lateral establecidas y un mínimo de 82,5 mm por delante de la línea de referencia trasera del capó. Los puntos de ensayo deberán estar situados de forma que el impactador no golpee primero de refilón en la parte superior del capó y rebote fuertemente contra el parabrisas o un montante A. Los puntos seleccionados para el ensayo con el impactador simulador de cabeza de niño deberán estar separados por una distancia mínima de 130 mm, y situarse a un mínimo de 65 mm de las líneas de referencia lateral establecidas y un mínimo de 65 mm por delante de la línea de referencia trasera del capó. Asimismo, cada punto seleccionado para el ensayo con el impactador simulador de cabeza de niño/adulto pequeño deberá encontrarse un mínimo de 130 mm por detrás de la línea de referencia delantera del borde del capó, a menos que ninguno de los puntos situados en la zona de ensayo del borde delantero del capó, dentro de una franja de 130 mm de ancho, requiera, en caso de ser escogido para un ensayo de muslo-borde delantero del capó, una energía cinética de impacto superior a 200 J.

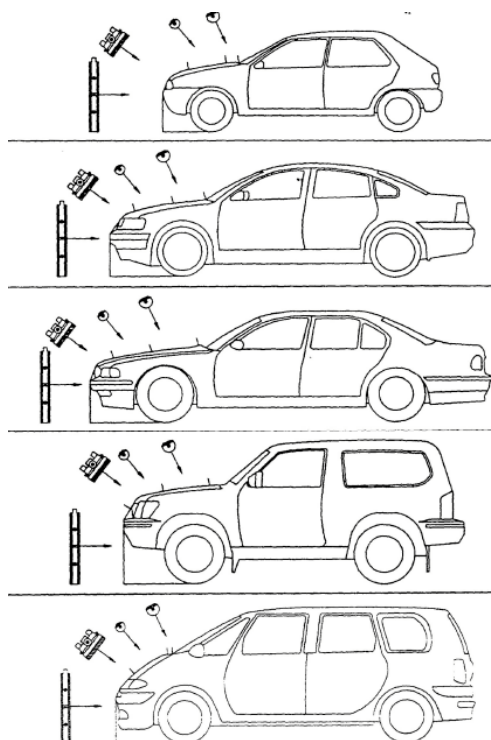
Los impactadores simuladores de cabeza de adulto y de niño serán esferas rígidas con piel sintética. Su diámetro será de  $165 \pm 1$  mm para la cabeza de adulto y de  $130 \pm 1$  mm para la cabeza de niño. Las masas totales respectivas, incluidos los instrumentos, serán de  $4,8 \pm 0,1$  kg para la cabeza de adulto y  $2,5 \pm 0,05$  kg para la de niño.

Los ensayos realizados con la parte posterior del capó se realizarán sin que el impactador simulador de cabeza toque el parabrisas o los pilares A antes de golpear el capó.

En los ensayos relativos a la sección delantera del capó se utilizará un impactador simulador de cabeza de niño, cuyos puntos de primer contacto estén situados entre los límites definidos por las distancias perimétricas de 1 000 mm y de 1 500 mm o por la línea de referencia trasera del capó.

En los ensayos relativos a la sección delantera del capó se utilizará un impactador simulador de cabeza de adulto, y los puntos de primer contacto estarán situados entre los límites definidos por las distancias perimétricas de 1 500 mm y 2 100 mm o por la línea de referencia trasera del capó.

La dirección del impacto será la del plano vertical longitudinal de la sección del vehículo ensayado. El margen de tolerancia de esta dirección será de  $\pm 2^\circ$ . La dirección de impacto de los ensayos realizados con la parte superior del capó será descendente y hacia la parte trasera, como si el vehículo se encontrase sobre el suelo. En los ensayos con impactador simulador de cabeza de niño, el ángulo de impacto será de  $50^\circ \pm 2^\circ$  respecto al nivel de referencia del suelo. En los ensayos con impactador simulador de cabeza de adulto, el ángulo de impacto será de  $65^\circ \pm 2^\circ$  respecto al nivel de referencia del suelo. Al calcular la velocidad de impacto a partir de las mediciones realizadas antes del primer contacto, deberá tenerse en cuenta el efecto de la fuerza de gravedad.



**Figura 3.9 – Localización de los impactos realizados en los ensayos en función de la geometría del vehículo [40 ]**

### 3.2.2 Organismos NCAP

Los consorcios NCAP (New Car Assessment Programme) o Programas de Valoración de Automóviles Nuevos, son asociaciones formadas por diferentes entidades cuyo propósito es valorar la seguridad de los nuevos vehículos que salen al mercado. Para hacer esto, se realizan diferentes tipos de crash test sobre el vehículo.

Una vez realizados los crash test, la seguridad de cada vehículo es evaluada en función de una serie de parámetros perfectamente definidos. Los datos recogidos en las pruebas de choque, son traducidos en una escala de puntuación y de colores, que es fácilmente interpretable por los futuros compradores.

Las pruebas realizadas por estos organismos, suelen ser diferentes a las realizadas para la homologación de un vehículo, siendo en muchos casos, pruebas que someten al automóvil a ensayos más comprometidos con la seguridad.

Con la aparición de los consorcios NCAP, los compradores han podido conocer fácilmente la seguridad pasiva ofrecida por los diferentes vehículos, y comparar la seguridad entre diferentes vehículos de la misma categoría.

La asociación NCAP más conocida en España es el consorcio europeo, EuroNCAP, aunque existen otros en Japón (JNCAP), Australia-Asia (ANCAP) o Estados Unidos (IIHS y NHTSA).

#### 3.2.2.1 EuroNCAP

El Programa Europeo de Valoración de Automóviles Nuevos (European New Car Assessment Programme) ha servido, como lo han hecho otros consorcios NCAP, para facilitar el acceso público a la información referente a la seguridad pasiva de los vehículos, en caso de producirse una colisión. EuroNCAP realiza distintos ensayos de choque a los vehículos nuevos que salen al mercado.

La acción que realizan los colectivos NCAP en todo el mundo, está haciendo indirectamente que los vehículos sean cada vez más seguros. La normativa sobre homologación de vehículos ante una colisión, establece unos valores mínimos que deben cumplir los vehículos, con lo cual, los fabricantes sólo están obligados a cumplir con esos mínimos de seguridad. Antes de que apareciesen las organizaciones NCAP, los fabricantes no tenían ningún incentivo para mejorar la seguridad. Sin embargo, al darse a conocer los resultados de los ensayos, está haciendo que los fabricantes se esfuercen en construir vehículos cada vez más seguros. De hecho, en la actualidad, en los anuncios publicitarios de los nuevos vehículos vendidos en Europa, se destaca la puntuación obtenida en los ensayos realizados por EuroNCAP [47] [53].

EuroNCAP es un consorcio independiente que agrupa a distintas administraciones y asociaciones europeas que representan a más de 150 millones de consumidores. Nació en 1997, respaldado por cinco gobiernos europeos, y entre sus integrantes destacan el Departamento de transportes del Reino Unido, la Administración de Carreteras de Suecia, Holanda, Francia, Alemania, la Alianza Internacional de Turismo, la Federación Internacional de Automovilismo y la asociación Testing, que agrupa a 25 organizaciones de consumidores. En España, participan en EuroNCAP, el RACE (Real Automóvil Club de España), el RACC (Real Automóvil Club de Cataluña) y la OCU (Organización de Consumidores y Usuarios) [54].

### **Selección de los vehículos**

Los ensayos de choque frontal intentan simular la colisión entre dos vehículos de masa y dimensiones similares, y por tanto, EuroNCAP realiza las pruebas comparando siempre vehículos de la misma categoría. No compara vehículos de categorías distintas, es decir, de masa y tamaño diferentes, puesto que dependiendo de la colisión, las respuestas de los vehículos pueden ser muy dispares.

Una vez elegida la categoría de vehículo a ensayar, se escoge el modelo más popular o representativo, el cual es comprado por EuroNCAP de forma anónima y con el equipamiento de seguridad de serie.

Durante todo el proceso llevado por EuroNCAP para ensayar un vehículo, los fabricantes están totalmente involucrados. Los fabricantes pueden subvencionar las pruebas de EuroNCAP si un vehículo no ha sido elegido para pasar las pruebas. También pueden subvencionar la ampliación del equipamiento de seguridad del vehículo que será ensayado. Además, si tras haberse realizado el ensayo, el fabricante modifica el vehículo, puede subvencionar un nuevo ensayo. En todos los casos, EuroNCAP publicará los resultados. Los fabricantes pueden asistir a la realización de todos los ensayos, teniendo la posibilidad de realizar cualquier observación, crítica o discusión, tanto de las pruebas como de los resultados, pudiéndose volver a realizar las pruebas si no satisfacen a los fabricantes, aunque los gastos de las nuevas pruebas correrán por parte de éste [53].

#### **3.2.2.1.1 Ensayos**

EuroNCAP evalúa la protección para los ocupantes del vehículo, es decir, la seguridad pasiva, sometiendo para ello al modelo de vehículo a una colisión frontal y a dos colisiones de tipo lateral. Además de estos ensayos, se realiza otro de protección del peatón frente al atropello[47]. Recientemente, en noviembre de 2008, se ha incluido el ensayo de "whiplash" o de latigazo cervical, aunque aún (fecha de redacción de este documento) no se ha dado a conocer el protocolo del ensayo ni los resultados.



### **3.2.2.1.1.1 Ensayo frontal**

El vehículo se hace colisionar contra una barrera deformable descentrada (ODB), de aluminio con estructura de panal de abeja, a 64 km/h. El vehículo choca contra la barrera con sólo el 40% del frontal, en el lado del conductor. En los asientos delanteros son colocados dos maniquíes de ensayo de choque, Hybrid III, mientras que en las plazas traseras se colocan dos sillas de niños con sus respectivos dummies infantiles.

Este ensayo es similar al descrito por la Directiva 96/79/CE, salvo por la velocidad mayor, de 64 km/h, y por la introducción de los dummies infantiles, con los cuales se puede evaluar la protección de los niños en caso de colisión.



**Figura 3.10 – Ensayo frontal EuroNCAP**

### **3.2.2.1.1.2 Ensayo lateral**

El ensayo de colisión lateral es similar al descrito por la directiva europea 96/27/CE, salvo por la incorporación de los dummies infantiles en las plazas traseras. El vehículo es alcanzado por un dispositivo, que simula otro vehículo, de forma perpendicular en el lado del conductor. El dispositivo que impacta lateralmente cuenta con una estructura deformable que simula el frontal de un vehículo, y su masa es aproximadamente de 950 Kg. El impacto se produce a 50 km/h.



**Figura 3.11 – Ensayo lateral EuroNCAP**

### **3.2.2.1.1.3 Ensayo de poste**

Este ensayo puede definirse como una variante del ensayo lateral. Consiste en hacer chocar el vehículo con un poste rígido contra uno de sus laterales, en general, en el lado del conductor. La finalidad del ensayo es comprobar la seguridad que el vehículo ofrece al conductor, ya que al tratarse de un objeto rígido, la intrusión en el habitáculo es mayor. El choque del poste debe situarse a la altura de la cabeza del conductor.

El ensayo simula la colisión contra un pilar o árbol. Este tipo de colisión suele causar graves lesiones en cabeza y columna vertebral, por la violencia del choque y por la invasión del habitáculo que se produce.

La prueba se lleva a cabo montando el vehículo sobre una plataforma que impulsa al vehículo contra el poste, fuertemente anclado. El vehículo debe chocar perpendicularmente con el poste a la altura de la cabeza del conductor. La velocidad del vehículo en la colisión es de 29 km/h. El poste empleado en la prueba es metálico y rígido, y tiene un diámetro de 254 mm.



**Figura 3.12 – Ensayo lateral de poste EuroNCAP**

### **3.2.2.1.1.4 Ensayo de atropello**

Como ya se ha comentado, aunque lo ideal sería poder realizar ensayos de atropello con dummies completos, la dificultad que existe para poder controlar el punto de impacto sobre el vehículo hace que EuroNCAP base su ensayo de atropello de peatón en los subsistemas o impactadores. Las pruebas de EuroNCAP para determinar la protección que ofrecen los vehículos a los peatones en caso de atropello están basadas en los métodos propuestos por el EEVC WG 17, que son la base de las vigentes Directivas Europeas [55] [56].

Como en el resto de ensayos de EuroNCAP, el resultado final es una puntuación global acompañada de un gráfico con un código de colores que representan la puntuación obtenida en cada una de las zonas donde se han realizado los ensayos. Como ejemplo de la valoración EuroNCAP para la prueba de atropello se incluye el resultado obtenido por el Citroën C6 (2005), que corresponde con la mayor puntuación obtenida por todos los vehículos ensayados hasta la fecha [47].



Figura 3.13 – Resultado del ensayo de atropello de EuroNCAP del Citroën C6 (Año 2005)

Los diferentes tests que se realizan sobre los vehículos con impactadores, intentan simular el impacto que tendrían las diferentes partes del cuerpo de un peatón en caso de ser atropellado a 40 km/h. En el caso del impacto de la cabeza, se simula tanto para el caso de un niño como de un adulto [47] [57].

Para localizar los posibles puntos de impacto de los subsistemas, la parte delantera del vehículo, tanto el parachoques como el capó, se dividen en diferentes zonas y cuadrículas, partiendo de las diferentes líneas de referencia determinadas por el EEVC WG17. La zona del parachoques y el frontal se dividen en seis cuadrículas, mientras que el capó se divide en doce cuadrículas, cada una con 4 cuadrantes, según las diferentes distancias wrap. Las seis superiores, marcadas en la figura con la letra A, corresponden con la zona donde se simulará el impacto de la cabeza de un adulto, mientras que las inferiores son las destinadas al impacto de la cabeza de un niño. El esquema de la división de la zona delantera del vehículo es el siguiente [56].

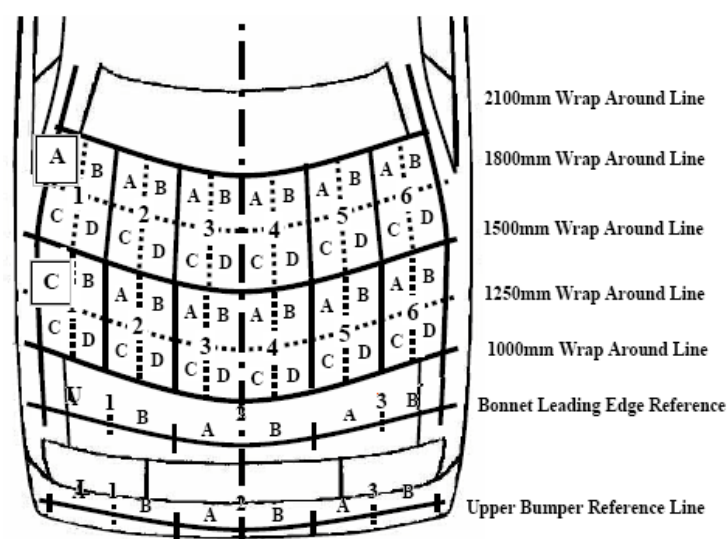


Figura 3.14 – División realizada por EuroNCAP en sus ensayos de atropello

Una vez realizada la división del vehículo se eligen los puntos de impacto de los diferentes subsistemas y las diferentes zonas. Según la zona del impacto, las localizaciones siguen el siguiente criterio:

- ♦ Test de parachoques e impactador de pierna completa. Se realizan tres impactos siguiendo una serie de limitaciones geométricas definidas en el protocolo, aunque siempre intentando que sean en los puntos que sean juzgados como los que mayor daño puedan producir.
- ♦ Test de línea superior de capó e impactador de pierna superior. Se realizan tres impactos, alineados con los puntos de los tres impactos realizados en el test anterior.
- ♦ Test de capó e impactador de cabeza. El número de puntos de impacto se limita a 12, y pueden ser elegidos en aquellos puntos donde se juzgue que puedan producirse mayores daños, como pueden ser en la zona de los anclajes de los amortiguadores, en el pilar A, en zona de la batería, en base del parabrisas, etc.

Además de estos puntos escogidos por EuroNCAP, el fabricante puede solicitar más puntos de impacto, con una limitación por tipo de test, si cree que los puntos seleccionados no ponen a prueba la protección real del vehículo.

Una vez realizado el test, se obtienen los valores de los sensores de los impactadores, a partir de los cuales es posible dar una valoración de protección. Se desconoce el baremo de puntuación asignado a cada valor de la magnitud medida, aunque sí se conocen los límites de las magnitudes significativas en cada ensayo, que pueden ser consultados en el protocolo de EuroNCAP [55].

Para la prueba global de protección al peatón es posible asignar hasta 36 puntos, ya que cada impacto puede ser valorado con un máximo de 2 puntos. En la valoración de cada impacto tiene influencia si el fabricante del vehículo ha solicitado la realización de algún impacto suplementario a los realizados por EuroNCAP.

El resultado final, como el mostrado en la figura superior, se obtiene al hacer corresponder las zonas de impacto de color verde con 2 puntos (máxima puntuación); las zonas de color rojo con 0 puntos (mínima puntuación); y las zonas amarillas con una puntuación que va desde 0.01 a 1.99 puntos.

### 3.3 SUBSISTEMAS O IMPACTADORES

La utilización de subsistemas o impactadores en la realización de los ensayos para determinar el posible daño sufrido por un peatón en caso de atropello puede considerarse la forma actualmente más empleada en todo el mundo. Es utilizada en las normativas de homologación de vehículos, como ya se ha visto, además de en otros ensayos dedicados a otros fines, como la investigación y desarrollo de nuevas medidas de seguridad y diseños en los vehículos, o para dar a conocer a los futuros compradores de vehículos la protección que ofrecen en caso de atropello.

Existen tres tipos de impactadores empleados en estos ensayos, cada uno de los cuales representa una parte o región del cuerpo del peatón que sufre un atropello:

- ◆ Pierna (muslo + tibia)
- ◆ Muslo y pelvis
- ◆ Cabeza

La razón por la que únicamente se emplean estos tipos de impactadores es que representan las zonas del cuerpo que se ven afectadas en mayor grado, tanto por distribución de las lesiones como por la gravedad de éstas, cuando se produce un atropello [34] [35]. La distribución de lesiones (AIS 2-6) puede verse en el siguiente cuadro, que corresponde con las cifras acumuladas para EEUU, Alemania, Japón y Australia, extraídas del informe de IHRA/PS WG del año 2001.

Región del cuerpo	Porcentaje de lesiones
Cabeza	31.4 %
Cara	4.2 %
Cuello	1.4 %
Pecho	10.3 %
Abdomen	5.4 %
Pelvis	6.3 %
Brazos	8.2 %
Miembros inferiores	32.6 %
Desconocida	0.2 %

**Tabla 3.1 - Distribución de las heridas de los peatones atropellados**

A través de la instrumentación con la que cuentan estos impactadores es posible recopilar datos sobre las fuerzas y aceleraciones que se producen en las partes del cuerpo simuladas, pudiendo después comparar estas sollicitaciones con los niveles de tolerancia conocidos del cuerpo humano. De esta forma se puede conocer aproximadamente el nivel de protección que ofrecen los vehículos, las lesiones, y el

grado de las mismas, que se producirían ante un atropello equivalente. A continuación se muestra el cuadro con los niveles de tolerancia del cuerpo humano que se emplea para conocer las posibles lesiones (Yang, 2002).

Parámetro	Segmento del cuerpo	Nivel de tolerancia
Fuerza	Tibia	4 kN
	Rodilla	2.5 kN
	Fémur	4 kN
	Pelvis	4 kN (femenino)
		10kN (masculino)
HIC	Adulto	1000
	Niño	1000
Aceleración lineal	Cabeza	80 g
	Tórax	60 g
	Tibia	150 g
Aceleración angular	Cabeza	3000 rad/s <sup>2</sup>
Ángulo de rotación	Rodilla	15 °
	Cuello	60 °
Momento flector	Rodilla	350 Nm
	Tibia	200 Nm
	Fémur	220 Nm
Dislocación	Rodilla	6 mm

**Tabla 3.2 – Niveles de tolerancia de las diferentes partes del cuerpo**

A pesar de que con estos tipos de ensayos la información está muy limitada, ya que se está simplificando un proceso tan complejo como es el atropello de un peatón, puede ser suficiente para los fines que se pretenden. Por ser ensayos relativamente sencillos permiten ser realizados por grandes y pequeños laboratorios, ya que los equipos necesarios no son extremadamente sofisticados y el espacio requerido para llevar a cabo las pruebas es reducido. Presentan otra gran ventaja, y es la posibilidad de poder controlar con una gran precisión el punto de impacto sobre el vehículo y su orientación, cosa que no ocurre si el ensayo se realizase mediante otros métodos.

Para poder hacer una descripción con más detalle de cada uno de los impactadores empleados en los ensayos de atropello basados en subsistemas, se han elegido los empleados en la Directiva 2003/102/CE, que han sido propuestos por el EEVC y que son usados en la mayoría de los laboratorios de pruebas de todo el mundo [32] [34].



### 3.3.1 Impactador simulador de miembro inferior

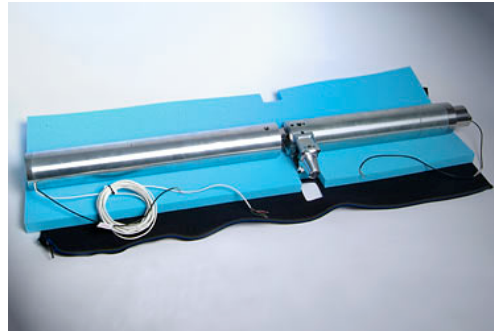
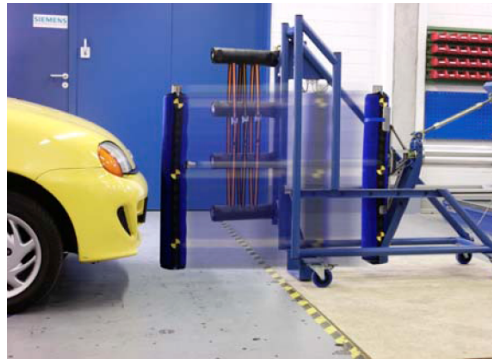


Figura 3.15 – Detalle del impactador de miembro inferior

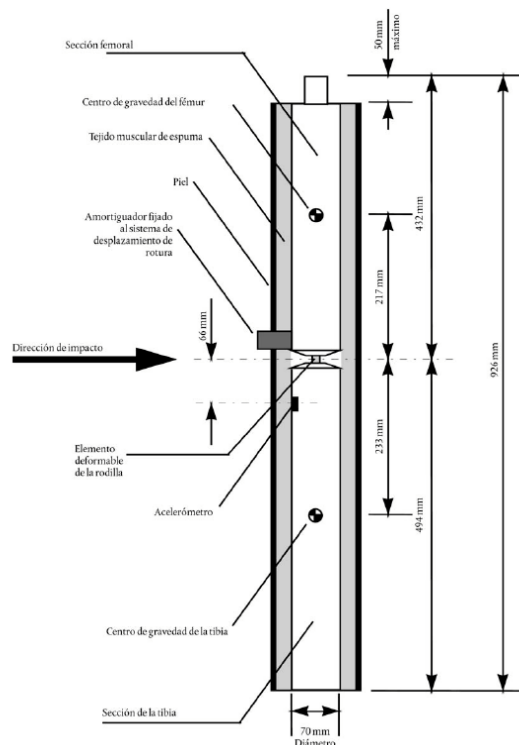
- ♦ La longitud total del impactador es de  $926 \pm 5$  mm, con una masa de  $13,4 \pm 0,2$  kg.
- ♦ El fémur y la tibia tienen un diámetro de  $70 \pm 1$  mm y ambos están recubiertos por «masa muscular» y «piel» de espuma. La «masa muscular» de espuma —espuma Confor™, tipo CF-45— tiene un grosor de 25 mm. La «piel» es de espuma de neopreno, recubierta por ambos lados de tela de nailon de 0,5 mm de grosor, con un grosor total de 6 mm. El «centro de la rodilla» se define como su punto efectivo de flexión. El «fémur» se define como el conjunto de componentes o partes de componentes (incluidos la masa muscular, el recubrimiento dérmico, el amortiguador, los instrumentos y soportes, las poleas y otros accesorios fijados al impactador para su lanzamiento) situados por encima del centro de la rodilla. La «tibia» se define como el conjunto de componentes o partes de componentes (incluidos la masa muscular, el recubrimiento dérmico, el amortiguador, los instrumentos y soportes, las poleas y otros accesorios fijados al impactador para su lanzamiento) situados por debajo del centro de la rodilla. Conviene observar que la tibia, tal como se define, incluye márgenes de tolerancia para la masa, etc., del pie.
- ♦ Las masas totales del fémur y la tibia son de  $8,6 \pm 0,1$  kg y  $4,8 \pm 0,1$  kg, respectivamente, y la masa total del impactador es de  $13,4 \pm 0,2$  kg.
- ♦ Los centros de gravedad del fémur y la tibia están respectivamente a  $217 \pm 10$  mm y  $233 \pm 10$  mm del centro de la rodilla.
- ♦ Los momentos de inercia del fémur y la tibia, sobre ejes horizontales que crucen los centros de gravedad respectivos y perpendiculares a la dirección del impacto, son respectivamente de  $0,127 \pm 0,010$  kgm<sup>2</sup> y  $0,120 \pm 0,010$  kgm<sup>2</sup>.
- ♦ En el lado no impactado de la tibia se coloca un acelerómetro uniaxial, a  $66 \pm 5$  mm del centro de la articulación de la rodilla y con su eje sensible orientado en la dirección del impacto.



**Figura 3.16 – Ensayo realizado con el impactador de miembro inferior**

- ♦ El impactador está dotado de un instrumento para medir el ángulo de flexión y el desplazamiento de rotura entre el fémur y la tibia.
- ♦ El sistema de desplazamiento de rotura está dotado de un amortiguador que puede montarse en cualquier punto de la cara trasera del impactador o en su interior. Las características del amortiguador deben permitir que el impactador se ajuste a los requisitos de desplazamiento de rotura de los ensayos estáticos y dinámicos y que no se produzcan excesivas vibraciones en el sistema de desplazamiento de rotura.

El impactador descrito en los párrafos anteriores está fabricado por la empresa TRL (Transport Research Laboratory). A pesar de ser el impactador de pierna “estándar” existen investigaciones sobre impactadores con diseños distintos, que buscan una mayor biofidelidad con la pierna humana ya que se considera que este impactador es demasiado rígido [35] [36]. TRL posee un nuevo impactador denominado Sensorleg, y existe otro impactador en estudio llamado FLEX-LFI 2003.



**Figura 3.17 - Esquema del impactador de miembro inferior**



### 3.3.2 Impactador simulador de muslo y pelvis



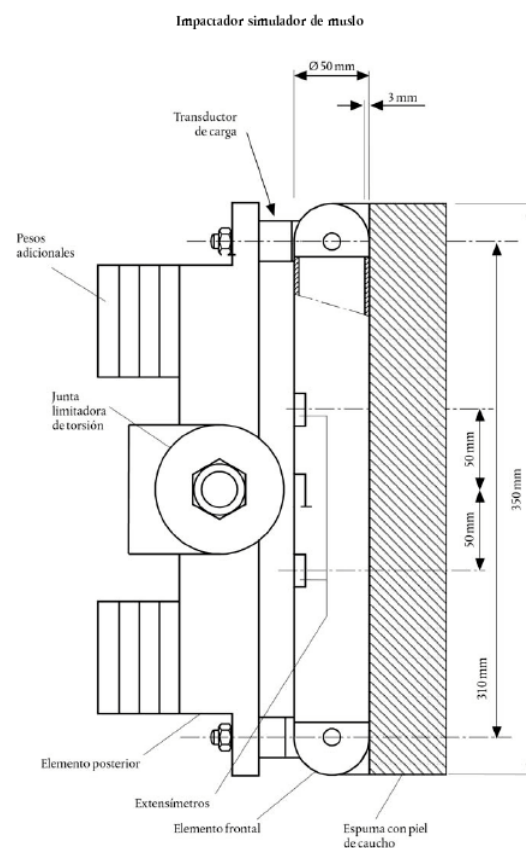
Figura 3.18 – Detalle del impactador de muslo y pelvis

- ♦ El impactador simulador de muslo debe ser rígido, tener recubierta de espuma el lado del impacto, y tener una longitud de  $350 \pm 5$  mm..
- ♦ La masa total del elemento delantero y otros componentes situados delante de las fijaciones de los transductores de carga, más las partes de las fijaciones de los transductores de carga situadas delante de los elementos activos, sin incluir la espuma y la piel, es de  $1,95 \text{ kg} \pm 0,05 \text{ kg}$ . La espuma consiste en dos capas de 25 mm de grosor de espuma Confor™, tipo CF-45. La piel es una capa de caucho reforzada con fibra de un grosor de 1,5 mm. La capa de espuma y la piel pesan  $0,6 \pm 0,1 \text{ kg}$  juntas (excluyendo todo refuerzo, elemento de montaje u otro utilizado para fijar los bordes traseros de la piel al elemento posterior). La espuma y la piel de caucho deben estar dobladas hacia atrás, con la piel fijada mediante espaciadores al elemento posterior de forma que sus bordes se mantengan paralelos. La espuma tiene un tamaño y una forma que permiten mantener un espacio hueco entre ella y los componentes situados detrás del elemento delantero, a fin de evitar transmisiones de carga significativas entre la espuma y los componentes.
- ♦ El elemento está equipado de extensímetros para medir los momentos de flexión en tres posiciones y estos utilizarán canales separados. Los extensímetros se montan en la parte trasera del elemento delantero del impactador. Los dos extensímetros exteriores deben ir situados a  $50 \pm 1 \text{ mm}$  del eje de simetría del impactador. El extensímetro central va situado sobre el eje de simetría, con un margen de tolerancia de  $\pm 1 \text{ mm}$ .
- ♦ La junta limitadora de torsión debe instalarse de modo que el eje longitudinal del elemento delantero sea perpendicular al eje del sistema de guía, con un margen de tolerancia de  $\pm 2^\circ$ . La torsión por fricción de la junta es de 650 Nm como mínimo.



**Figura 3.19 - Ensayo realizado con el impactador de muslo y pelvis**

- ♦ El centro de gravedad de las partes del impactador situadas delante de la junta limitadora de la torsión, incluido cualquier peso fijado, debe situarse en la línea longitudinal central del impactador, con un margen de tolerancia de  $\pm 10$  mm.
- ♦ El espacio entre las líneas centrales de los transductores de carga es de  $310 \pm 1$  mm, y el diámetro del elemento delantero es de  $50 \pm 1$  mm.

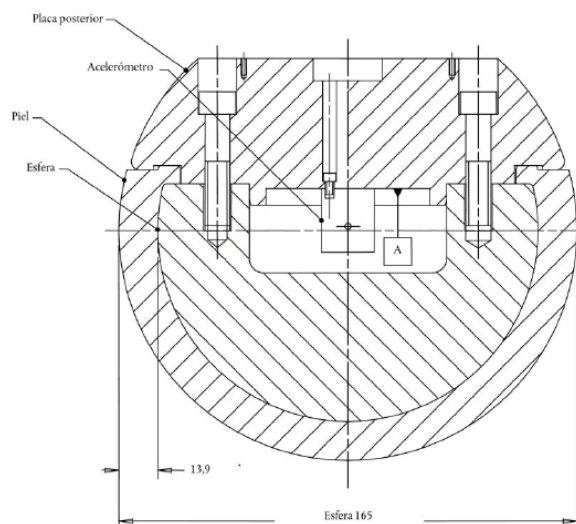


**Figura 3.20 - Esquema del impactador simulador de muslo y pelvis**

### 3.3.3 Impactadores simuladores de cabeza

#### **Cabeza de adulto**

- ♦ El impactador simulador de cabeza de adulto consiste en una esfera de aluminio de construcción homogénea. Su diámetro es de  $165 \pm 1$  mm., y la masa total, incluidos los instrumentos, es de  $4,8 \pm 0,1$  kg.. Al menos la mitad de la esfera estará recubierta de una piel sintética de vinilo de  $13,9 \pm 0,5$  mm de grosor.
- ♦ El centro de gravedad del impactador simulador de cabeza de adulto, incluyendo los instrumentos, está en el centro de la esfera, con un margen de tolerancia de  $\pm 5$  mm. El momento de inercia en torno a un eje que pasa por el centro de gravedad y es perpendicular a la dirección de impacto es de  $0,0125 \pm 0,0010$  kgm<sup>2</sup>.
- ♦ La esfera debe estar provista de un hueco para montar un acelerómetro triaxial o tres uniaxiales. Uno de los acelerómetros tiene su eje sensible perpendicular a la cara de montaje A y su masa sísmica se posiciona dentro de un campo de tolerancia cilíndrico de un radio de 1 mm y una longitud de 20 mm. La línea central del campo de tolerancia es perpendicular a la cara de montaje y su punto central coincide con el centro de la esfera del impactador simulador de cabeza. Los acelerómetros restantes tienen sus ejes sensibles perpendiculares entre sí y paralelos a la cara de montaje A, y su masa sísmica se posiciona dentro de un campo de tolerancia esférico de un radio de 10 mm. El centro del campo de tolerancia coincide con el centro de la esfera del impactador simulador de cabeza.



**Figura 3.21 – Esquema del impactador de cabeza de adulto**

### Cabeza de niño

- ♦ El impactador simulador de cabeza de niño consiste en una esfera de aluminio de construcción homogénea. Su diámetro es de  $130 \pm 1$  mm., y la masa total, incluidos los instrumentos, es de  $2,5 \pm 0,05$  kg. Al menos la mitad de la esfera estará recubierta de una piel sintética de vinilo de  $11 \pm 0,5$  mm de grosor.
- ♦ El momento de inercia en torno a un eje que pasa por el centro de gravedad y es perpendicular a la dirección de impacto es de  $0,0036 \pm 0,0003$  kgm<sup>2</sup>.
- ♦ El resto de características son similares a las del impactador de cabeza de adulto.

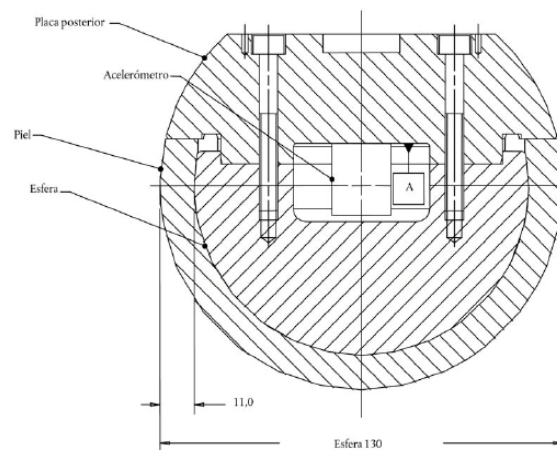


Figura 3.22 – Esquema del impactador de cabeza de niño

Todos los impactadores descritos deben pasar periódicamente, o cada cierto número de ensayos, un minucioso proceso de certificación para comprobar que siguen siendo válidos para realizar las diferentes pruebas. En este proceso los impactadores son revisados verificando que los materiales se encuentran en perfecto estado y que las dimensiones están dentro del margen permitido. Además de la inspección, los impactadores son sometidos a varios ensayos, tanto estáticos como dinámicos, tras los cuales se comparan sus resultados con los requisitos que deben cumplir y que están expresados en forma de gráficas. Este proceso de certificación puede ser consultado en las prescripciones técnicas de la Directiva 2003/102/CE y en el documento del EEVC WG17.



Figura 3.23 - Ensayo realizado con el impactador de cabeza

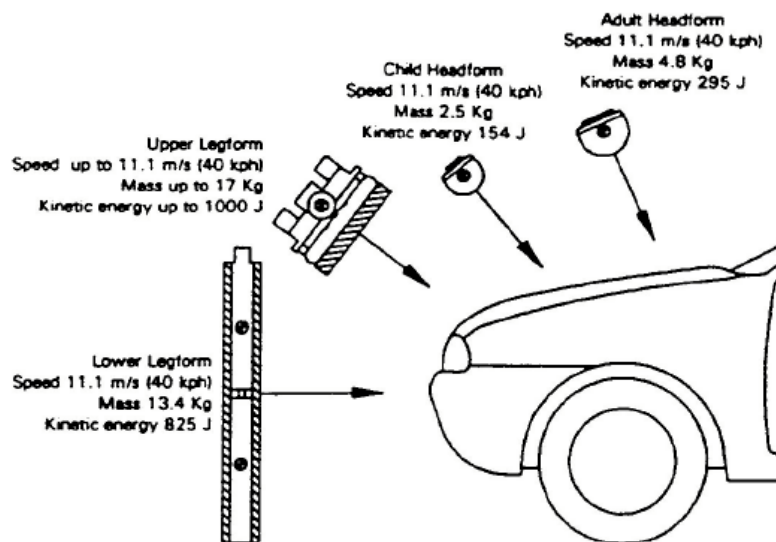


Figura 3.24 – Esquema resumen de los diferentes ensayos realizados con impactadores o subsistemas, propuestos por EEVC WG17 [34]

### 3.3.4 Normas ISO

Además de los ensayos propuestos por el EEVC WG17, ISO (International Organization for Standardization) dispone de sus propios ensayos recogidos en tres de sus normas. ISO está dividido en diferentes comités técnicos, cada uno de los cuales se dedica a una faceta de la industria o de la tecnología diferente. De entre todos estos, existe el Comité Técnico 22 (TC 22) dedicado a los vehículos terrestres. A su vez cada comité está dividido en grupos de trabajo o subcomités que se encargan específicamente de un asunto de los muchos relacionados con el tema principal del comité. El Subcomité 10 se dedica a estudiar los procedimientos de pruebas de impactos relacionados con los vehículos terrestres, y de los posibles tests de impactos que el TC22/SC 10 regulan, se encuentran las pruebas de impacto de peatón, de cuyo procedimiento se encarga el grupo de trabajo 2 (WG 2). Estas pruebas, al igual que las propuestas por el Grupo de

Trabajo 17 del EEVC están basadas en impactadores que simulan diferentes partes del cuerpo humano.

Las tres normas ISO que regulan las pruebas de impacto son:

- ♦ **ISO 14513:2006**, referida a la protección del peatón y que especifica el Método del Test de Impacto de Cabeza. La norma se publicó en el año 2006, sin que su actual estado haya cambiado.
- ♦ **ISO 16850:2007**, referida a la protección del peatón y que especifica el Método del Test de Impacto de Cabeza Infantil. La norma se publicó en el año 2007, sin que su actual estado haya cambiado.
- ♦ **ISO 11096:2002**, referida a la protección del peatón y que especifica el Método de Test de Impacto de Muslo, Pierna y Rodilla. La norma se publicó en el año 2002, y actualmente su estado es el de revisión.

A pesar de no haber podido tener acceso directo a las normas ISO, según algunos artículos consultados, las pruebas ISO son en gran parte similares a las propuestas por el EEVC, salvo en pequeñas diferencias en alguno de los parámetros de los ensayos (*Stammen*) (Mizumo, 2003) (Mizumo, 2005).



## 3.4 SISTEMAS DE TAMAÑO REAL

Los ensayos realizados a escala real pueden ser considerados como las pruebas más completas ya que permiten simular un atropello teniendo en cuenta muchas variables sin necesidad de realizar grandes simplificaciones, y la información que puede ser obtenida es, en general, más completa que con los ensayos basados en impactadores. Sin embargo, a pesar de ser ensayos mejores, su empleo hoy en día aún es minoritario.

Una de las mejoras más importantes de los ensayos realizados a escala real, con un peatón y un vehículo, es que se consigue recopilar datos, además de la biomecánica lesional del peatón, de la cinemática del atropello, pudiendo conocer qué partes del cuerpo de peatón colisionan con el vehículo o con el suelo. Cuando se emplean impactadores, el atropello es simulado considerando únicamente aquellas partes que del cuerpo que estadísticamente se ven más afectadas, pero no es posible estudiar las lesiones en el cuerpo completo.

El elemento más importante en estos ensayos de atropello es la figura del peatón, que dependiendo del alcance o de la información que se quiera obtener de la prueba, puede tratarse de un animal, un cadáver, un voluntario o un maniquí de pruebas. Como se muestra en un apartado posterior, los maniqués de pruebas o crash test dummies en su variante de peatón son los elementos más empleados, ya que han sido específicamente diseñados para soportar las pruebas. Además, gracias a la gran instrumentación que albergan, permite recopilar una gran cantidad de datos para su posterior análisis. Sin embargo, no hay que olvidar que para poder desarrollar estos maniqués de prueba han sido necesarios muchos ensayos de atropello en los que los peatones han sido animales, voluntarios y cadáveres.

Gracias a la existencia de grandes laboratorios donde se emplean vehículos completos es posible realizar atropellos con configuraciones muy diversas, modificando la velocidad del impacto, la posición y orientación del peatón respecto al vehículo, etc. Esto permite tener un mayor conocimiento de un atropello, desde el punto de vista de las lesiones, debido a la instrumentación del peatón, o desde el punto de vista de la cinemática del atropello gracias a la utilización de equipos de vídeo de alta velocidad. Con todo esto, y con la toma de datos tras el atropello, estos ensayos completos de atropello pueden ayudar a clasificar los atropellos en varios grados de gravedad, que pueden servir en desarrollos de medidas de seguridad para el automóvil, o emplearse para mejorar y avanzar en la ciencia de la reconstrucción de accidentes de tráfico. Algunos de los avances tecnológicos en la protección de peatones de los vehículos citados en el capítulo anterior no serían posibles sin la realización de estos ensayos a escala real.

Este tipo de ensayos de atropello son empleados fundamentalmente por los diferentes fabricantes de vehículos y otras empresas, para poder desarrollar nuevos sistemas de protección, pero aún parece lejano que su uso se extienda hasta ser usados en los ensayos de homologación de los vehículos, por ejemplo.

Es difícil explicar por qué los ensayos a escala real aún son minoritarios, aunque posiblemente la razón más importante sea el mayor coste que suponen debido a:

- ◆ Los ensayos requieren de instalaciones más grandes y complejas.
- ◆ La necesidad de emplear peatones, que en la mayoría de las ocasiones son crash test dummies, cuyo coste es elevado.
- ◆ El equipamiento auxiliar utilizado en las pruebas, como son las cámaras de alta velocidad.
- ◆ La posibilidad de poder realizar varios atropellos completos con un único vehículo es reducida, por los mayores daños que sufren en las pruebas.
- ◆ La realización de pruebas no regularizadas o estándar suponen siempre mayores costes y mayor empleo de tiempo.
- ◆ El análisis de los datos recogidos durante el atropello, resulta más laborioso, ya que se trata de una mayor cantidad de información, y más compleja, que procesar.

En algunos laboratorios de investigación, probablemente para minimizar el alto coste de este tipo de pruebas, emplean catapultas para mover unas plataformas donde se colocan únicamente las carrocerías de los vehículos, o parte de ellas. De esta forma es posible realizar ensayos a escala real de una forma más sencilla, con una necesidad de espacio menor, manteniendo la posibilidad de cambiar la configuración del atropello modificando la orientación del frontal del vehículo sobre la plataforma (*Sung-won Ko, 2001*) (*Kerrigan*) [37].



**Figura 3.25 – Ensayo de atropello con catapulta impulsora y dummy**



Debido a que la información recogida en las pruebas es de gran calidad, ya que se realizan en ambientes controlados y donde se recopila un elevado volumen de datos, pueden emplearse para poder extraer correlaciones de los ensayos entre las posibles lesiones en el peatón con la velocidad del vehículo, o la relación entre la velocidad y las zonas del cuerpo afectadas, así como la influencia de la geometría del frontal de vehículo en los resultados. En todo caso, con estos ensayos se aumenta el conocimiento general del atropello y pueden ayudar a la mejora y el avance de la ciencia de la reconstrucción de accidentes de tráfico. Gracias a los ensayos a escala real es posible, por ejemplo, determinar la velocidad a la que debe producirse el atropello para que la cabeza del peatón impacte en una zona determinada del vehículo. A partir de repetidos ensayos a diferentes velocidades es posible obtener gráficos similares al de la Figura 3.21, que pueden ser útiles para aproximar la velocidad del accidente por el daño analizado en el vehículo (*Pritz, 1983*).

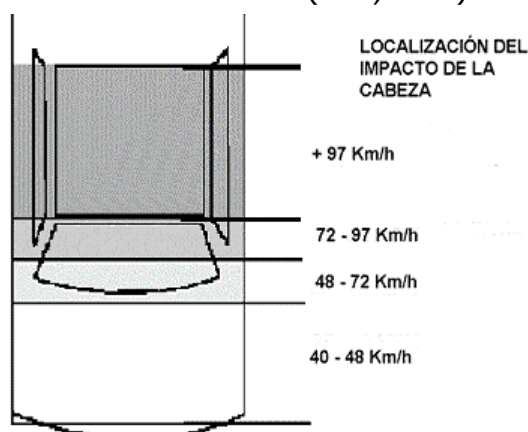
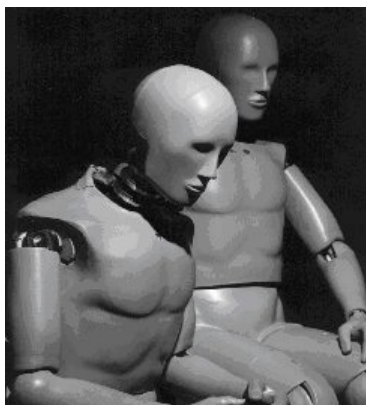


Figura 3.26 - Zona de impacto de la cabeza del peatón en función de la velocidad del vehículo

### 3.4.1 Crash Test Dummies

Los nombres que se pueden usar para referirse a estos objetos son muy variados. Pueden ser llamados A.T.D., Anthropomorphic Test Device, es decir, dispositivo antropomórfico de prueba, o, Antrhopomorphic Test Dummy, muñeco antropomórfico de prueba. Cuando los ATD son empleados específicamente en pruebas de altas aceleraciones o impactos, reciben el nombre de Crash Test Dummy. En español pueden ser llamados, maniquí de prueba de choque o muñeco de prueba de choque. Aunque sin duda, el nombre más conocido y empleado en todo el mundo es el de crash test dummy, incluso para denominar a aquellos dispositivos empleados en pruebas que no son de choque.



**Figura 3.27 – A.T.D o Crash Test Dummy**

La función principal de cualquier tipo de dummy es la de sustituir al ser humano en ensayos en los que se intenta evaluar la respuesta del cuerpo humano ante diferentes situaciones que, en general, pueden producir algún tipo de daño, más o menos grave al individuo. Desde hace más de cincuenta años, los dummies se han usado en diferentes situaciones, como pueden ser:

- ◆ Pruebas de choque de vehículos.
- ◆ Ensayos de atropello.
- ◆ Test de paracaídas o asientos eyectables de aviones.
- ◆ Pruebas de prendas ignífugas.
- ◆ Ensayos de explosión o radiación.
- ◆ Aplicaciones médicas.

Para que estos dispositivos puedan cumplir su función de forma eficiente, suministrando datos de los ensayos, deben cumplir una serie de requisitos [38] [39] [40] [41] [42].

### ***Simplicidad***

Como en la mayoría de las aplicaciones de ingeniería, en el caso de los crash test dummies también es necesario realizar simplificaciones más o menos complejas, sobre todo teniendo en cuenta que lo que se pretende reproducir es algo tan “sofisticado” como es un cuerpo humano. Las simplificaciones realizadas en el dummy pueden ir orientadas a aspectos geométricos, articulares o de acabado exterior, siempre teniendo en cuenta que el modelo final tenga un comportamiento similar al cuerpo humano durante el ensayo. Teniendo en cuenta esto, por ejemplo, el maniquí para pruebas de atropello no será igual al utilizado para evaluar eficacia ignífuga de un traje de bombero. En el primer ejemplo es necesario que el dummy cuente unas características geométricas y másicas similares a las del cuerpo humano, mientras que en el segundo caso, interesa más reproducir la piel u otros órganos que pueden verse afectados por la alta temperatura o las llamas.

**Antropometría**

En la mayoría de aplicaciones, aunque existan excepciones, se requieren que el cuerpo del dummy tenga un aspecto exterior y unas dimensiones similares a las del cuerpo humano. Para eso se deben reproducir las principales características antropométricas de una persona, como son:

- ♦ Dimensiones de los segmentos del cuerpo. Existen diferentes tamaños de maniquíes que representan a niños de diferentes edades o adultos de complexiones físicas distintas.
- ♦ Localización de las articulaciones y otras referencias anatómicas, como pueden ser la vértebra T1.
- ♦ Propiedades másicas y de inercia, como son la localización de los centros de gravedad de los segmentos, los momentos de inercia o los ejes principales de inercia.
- ♦ Apariencia exterior de volúmenes y formas aproximadas.

**Biofidelidad**

Esta es la principal y más importante cualidad que debe poseer un dummy de prueba, y a la vez, tal vez sea la más complicada de obtener. La biofidelidad hace referencia a la capacidad del dummy para comportarse de forma similar a un cuerpo humano, ante impactos, aceleraciones, etc. Los datos necesarios para conseguir una buena biofidelidad se consiguen a partir de múltiples ensayos realizados sobre voluntarios, animales o cadáveres. Posteriormente el dummy se prueba hasta conseguir un comportamiento que se mantenga dentro de un margen de correspondencia con los datos de partida.

**Repetibilidad**

Considerando al dummy como un instrumento de laboratorio, es necesario que presente una alta repetibilidad en los resultados, es decir, que ante una misma prueba el dummy facilite el mismo resultado. Por esto siempre antes y después de cada prueba se analizan para comprobar que su funcionamiento es correcto y que los valores obtenidos son válidos.

**Reproducibilidad**

Esta cualidad está relacionada con la correcta calibración del dummy y la regulación con normas de los diferentes ensayos, para poder ser reproducidos en distintos momentos. Se debe asegurar que un mismo ensayo sobre varios dummies, con el mismo diseño, ofrezcan los mismos resultados independientemente del laboratorio donde se realice, o los técnicos que participen en la prueba. Deben existir ensayos de certificación tanto del dummy completo como de sus diferentes partes para comprobar su correcto funcionamiento. Tras la realización de un número perfectamente definido, de ensayos, los dummies suelen ser sometidos a un proceso de certificación completo.

Cuando los resultados de estas comprobaciones no son correctos, o bien se reajusta o se sustituye la parte del dummy deficiente.

### ***Sensibilidad***

Los dummies deben ser capaces de percibir diferentes magnitudes físicas (o cambios en ellas) a partir de las cuales poder extraer unos resultados útiles de los ensayos. Todos los dummies van equipados con diferentes tipos de sensores especialmente colocados, y elegidos, según el ensayo a realizar. En el caso de los crash test dummies, estos sensores son básicamente acelerómetros, células de carga y extensómetros, situados en las diferentes partes del cuerpo, que miden en varios ejes y con distintos niveles de sensibilidad. A partir de los datos recogidos por los sensores, y gracias a una serie de correlaciones, es posible predecir el daño que sufriría un ser humano si es sometido a esa prueba.

### ***Durabilidad***

El uso intensivo al que son sometidos los dummies en algunas pruebas, así como la agresividad de éstas, hace necesario que estos dispositivos tengan una alta durabilidad. Deben ser resistentes y ser capaces de aguantar un número determinado de ensayos, tanto el conjunto completo como sus elementos individuales. En caso de rotura de un elemento o funcionamiento deficiente, detectado en los constantes análisis y ensayos de certificación, las partes dañadas son reparadas o sustituidas. Los dummies modernos son como “mecanos” cuyas piezas pueden ser sustituidas en su totalidad, ya que todas ellas están perfectamente identificadas y referenciadas para permitir un correcto mantenimiento del maniquí. Incluso la cubierta exterior de los crash test dummies, realizada en material sintético (con base de vinilo) puede ser desprendida del esqueleto metálico del maniquí para ser sustituida, como consecuencia de las abrasiones, cortes, roturas o quemaduras sufridas durante las pruebas.

### ***Manejabilidad***

Debido a que estos dispositivos son empleados en repetidas ocasiones, deben ser lo más manejables posibles para facilitar las tareas preparatorias de los ensayos. No hay que olvidar que algunos dummies representan personas adultas, cuya masa puede rondar los 80 kg. y 1.8m. de altura, y que son “pesos muertos”. Además, las numerosas tareas de inspección, mantenimiento y certificación a las que son sometidos entre ensayo y ensayo, hace necesario contar con útiles especiales que faciliten su manipulación. Por esto, en la mayoría de los casos, los dummies cuentan entre su equipamiento auxiliar con soportes, en forma de bastidor o silla para ser almacenados, o pequeñas grúas para su manipulación y posicionamiento en las pruebas.

### ***Coste***

Dependiendo del tipo de dummy del que se trate, su precio puede variar mucho, pero teniendo en cuenta que son dispositivos de alta tecnología, el precio por unidad puede

ser de decenas de miles de euros. Al precio del dispositivo hay que sumarle el de los útiles especiales necesarios para su manipulación, las piezas de recambio para la sustitución de las dañadas, así como el equipamiento variable de sensores y captadores de datos. Debido a que, en general, los dummies sufren desperfectos en las pruebas, en el diseño del maniquí debe tenerse este aspecto en cuenta para conseguir un equilibrio entre resistencia y durabilidad con el coste del dispositivo. Es decir, construir el dummy de la forma más barata posible pero eligiendo los materiales adecuados para mantener una óptima funcionalidad del dispositivo. Además, el diseño debe tener en cuenta que las numerosas operaciones que se les realiza, y por tanto, deben permitir el desmontaje y el acceso a los dispositivos internos de una forma sencilla y rápida.

En este apartado del capítulo se describen los principales tipos de dummies que se utilizan actualmente, así como los que se han utilizado a lo largo de la historia, haciendo mayor hincapié en los dummies utilizados en las pruebas de atropello, por estar directamente relacionados con el tema principal de este Proyecto Fin de Carrera.

### **3.4.1.1 Fabricantes de Crash Test Dummies**

De los diferentes fabricantes que pueden existir en el mundo, es posible destacar a tres de ellos como los más importantes, por número total de ventas así como por los diferentes tipos de dummies que fabrican. Todos ellos son fabricantes estadounidenses, aunque sus productos son vendidos y utilizados en todo el mundo por cientos de empresas y entidades. En ocasiones algunos de estos dummies han sido desarrollados conjuntamente con otras empresas, como es el caso del dummy POLAR II, que nace de la colaboración de Honda R&D Ltd. y el fabricante GESAC Inc.

Los tres fabricantes más importantes del mundo son [42] [43] [44] [45]:

- ◆ First Technology Safety Systems (Michigan, EEUU)
- ◆ Denton ATD (Michigan-Ohio, EEUU)
- ◆ GESAC (Maryland, EEUU)

El primero de ellos, FTSS, es el fabricante más importante del mundo, cuya cuota de mercado se sitúa cerca del 80%.

Además de fabricar los dummies, también facilitan el resto de material necesario para el empleo de los maniqués de prueba como pueden ser: acelerómetros, células de carga, sillas y cajas de almacenamiento y transporte, así como todo el equipamiento necesario para la calibración y mantenimiento de los dummies. También ofrecen otros servicios de carácter técnico y de asesoría.

Otra de las actividades que desarrollan alguna de estas empresas, aparte de la fabricación de los dummies, es la distribución de modelos de simulación de los dummies para ser empleados en diferentes programas informáticos. Todos los modelos realizados han sido validados en las propias instalaciones del fabricante, lo que permite a sus clientes emplear los dummies directamente en las simulaciones[42].

### 3.4.1.2 Historia de los Crash Test Dummies

Al igual que el uso del cinturón de seguridad en el automóvil, los dummies utilizados en los crash tests tuvieron su origen en la aviación [39] [40] [42] [46]. La siguiente es una breve referencia con los hechos más destacados en la historia de los crash test dummies.

En 1949, la empresa norteamericana Sierra Engineering Co., desarrolla el dummy "Sierra Sam", de 90 kilos correspondiente al percentil 95%, para la realización de las pruebas de los asientos de eyección de los aviones, a través de un contrato con las Fuerzas Aéreas de Estados Unidos. Contaba con la forma y el peso de un cuerpo humano y se utilizaba para medir aceleraciones. Existe un informe de las Fuerza Aéreas que explica como algunos "extraterrestres" vistos en Nuevo México en la década de los cuarenta, eran en realidad dummies lanzados desde gran altura para observar su comportamiento durante la caída.



**Figura 3.28 – Dummy "Sam", de la empresa Sierra Engineering**

En ese mismo año aparece otro dummy denominado "OSCAR", de 120 libras utilizado también en investigaciones de la aviación, como fueron pruebas de trineo de cohetes y tests de descompresión en aeronaves.



**Figura 3.29 – Dummy OSCAR (Año 1949)**

En 1956, la empresa norteamericana fabricante de automóviles, General Motors, GM, tras asistir a una conferencia de las Fuerzas Aéreas donde los investigadores militares explicaban los estudios realizados con los dummies en las pruebas de expulsión del asiento, comienza a considerar la utilización de los dummies en las pruebas de choque de los automóviles.

En 1960 la empresa Alderson Research Labs crea el GARD (Grumman-Alderson Research Dummy), que contaba con un transductor de 12 canales, y con una buena aproximación a los momentos de inercia y centros de gravedad de los diferentes segmentos del cuerpo humano.



**Figura 3.30 – Dummy GARD (Año 1960)**

En 1966, el Congreso de Estados Unidos, establece la Ley de Seguridad de los Vehículos con Motor, que regula la industria del automóvil y establece normas de seguridad para el automóvil. GM busca formas de mejorar los dummies y crea un método versátil para determinar el posible riesgo y grado de lesiones producido, midiendo las fuerzas de impacto sobre los dummies durante las pruebas de laboratorio. También en ese año aparecen los dummies VIP Series, que cuentan con cubierta externa de vinilo e interior de espuma, con dimensiones basadas en estudios antropométricos y una alta biofidelidad. Además cuenta con célula de carga en el fémur. Se trata del primer crash test dummy realizado exclusivamente para su uso en aplicaciones relacionadas con el automóvil. Dos años más tarde, Ford, GM y NBS comienzan a emplear un dummy VIP Series de percentil 50%, el VIP-50 A.



En 1967 se crea el Sierra Stan, de percentil 50%, creado para ensayos de interacción del cinturón de seguridad. Cuenta con nuevo diseño de cuello, permite mediciones de aceleración y fuerza, además de ofrecer datos sobre la deformación en el pecho.

Utilizando los mejores componentes de los dummies, VIP y Sierra Stan, GM en 1971 desarrolla su primer dummy, llamado Hybrid I, de percentil 50%. Este dummy híbrido, llamado así por crearse combinando los dos modelos, es usado internamente por GM para sus pruebas privadas.

Un año más tarde, en 1972, GM mejora el Hybrid I y crea el Hybrid II. Este nuevo dummy cuenta con articulaciones mejor realizadas en los hombros, la columna vertebral y las rodillas, por lo que se obtienen mayor número de datos que con el Hybrid I. GM comparte sus diseños con el resto de la industria del automóvil y los organismos reguladores federales. El Hybrid II representa una innovación en el desarrollo de los dummies gracias a su durabilidad, lo que permite que el mismo dummy se utilice repetidamente. El Gobierno Federal aprueba su homologación (se trata del primer dummy regulado) y lo convierte en el dummy estándar para la realización de pruebas de colisión frontal con sistemas de sujeción. A pesar de estas mejoras, los investigadores buscan un dummy con más características humanas e inmediatamente comienzan a trabajar en la tercera generación.

En 1973, GM asume un contrato del gobierno que solicita un dummy más refinado. Utilizando el Hybrid II como base, y con la ayuda de los miembros del comité de la Sociedad de Ingenieros del Automóvil (SAE) y los proveedores de dummies, los investigadores mejoran la postura y crean una nueva cabeza, además de agregar mejoras en las articulaciones. A este nuevo dummy se le da el nombre de GM ATD 502. Como curiosidad, GM acepta firmar el contrato con el gobierno, pero éste sólo paga un dólar, por deseo expreso de GM.

En 1976 se continúa con la mejora del GM ATD 502, finalizando en la aparición del Hybrid III. De nuevo, GM comparte sus diseños con sus competidores y organismos del gobierno. En 1977 sale a la venta el Hybrid III.

En 1983, GM solicita a la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) que utilice el Hybrid III como dispositivo de prueba para el cumplimiento de la regulación gubernamental. GM también suministra, al sector y al gobierno, los objetivos que debe cumplir el dummy durante la realización de pruebas de seguridad, los cuales son cruciales para poder traducir la información suministrada por el Hybrid III en las mejoras de seguridad aplicables al mundo real. Tres años después, la NHTSA accede a la demanda de GM.

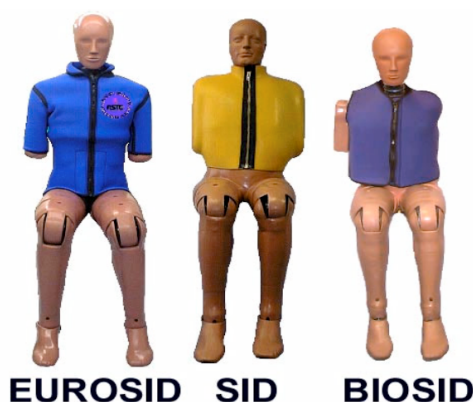


Durante los siguientes años comienza a crecer la familia de dummies Hybrid III con la creación de variantes de otros percentiles, tanto de hombre como de mujer, así como de niños. Aparecen otros dummies como el LRE ATD, o el ADAM ATD



**Figura 3.31 – Familia Hybrid III, con todas sus versiones**

En la década de los años 90 comienza una gran expansión y desarrollo en el sector con la aparición de diferentes dummies ideados para ser usados en pruebas choque de otro tipo. Se desarrollan los maniquíes para las pruebas de choque lateral como son el EuroSID-1, el BIOSID o el SID-IIIs.



**EUROSID SID BIOSID**

**Figura 3.32 – Distintas versiones de dummies de impacto lateral**

En 1991, la Organización Internacional de Regulación, ISO, aprueba una resolución unánime en la que se reconoce la superioridad del dummy Hybrid III de GM. El IIHS, Insurance Institute for Highway Safety de Estados Unidos acepta esta resolución.

En 1997, la NHTSA declara al dummy Hybrid III como el único dispositivo para pruebas de impacto frontal oficial que cumple con las pruebas de sujeción de ocupantes. Este dummy reemplaza al Hybrid II de GM.

En 1998, el Hybrid III se convierte en el dispositivo oficial europeo para pruebas de sujeción contra impacto frontal, y el más usado hasta la fecha en todo el mundo.

A partir del año 2000 vuelve a haber una nueva evolución en los dummies, apareciendo nuevos dummies como el THOR utilizado en los ensayos de choque frontal, o los empleados en pruebas de choque lateral como el WorldSID, EuroSID-2. También aparece el BIORID-II empleado en pruebas de impacto trasero o los utilizados en los ensayos de atropello como el POLAR II o el Hybrid III en su versión de peatón.

### **3.4.1.3 Tipos de Crash Test Dummies**

Los crash test dummies son maniquíes de prueba ideados específicamente para ser utilizados en los ensayos de choque a los que son sometidos los vehículos para poder evaluar de una forma más completa las medidas de seguridad pasiva.

Al igual que existen diferentes tipos de crash test, también existen distintos maniquíes de prueba, empleados cada uno de ellos de forma específica en las variadas tipologías de pruebas de choque que existen.

A continuación se enumeran los diferentes maniquíes de pruebas de choque que se emplean actualmente [40] [47] [48] [49].

#### **3.4.1.3.1 Dummies empleados en pruebas de impacto frontal**

Es posible destacar dos modelos de dummies, el Hybrid III y el THOR, aunque es el primero de ellos el más importante en la actualidad ya que es el más utilizado y considerado en diferentes normas de homologación de vehículos. THOR, aunque es un dummy mucho más avanzado y moderno, aún está en desarrollo y todavía su uso se limita a la investigación.

##### **3.4.1.3.1.1 Hybrid III**

Desde su aparición en 1971 se convirtió en el dummy de pruebas de vehículos estándar en muchos países del mundo. Su esqueleto de acero se asemeja al de un individuo masculino de percentil 50%, poseyendo las características másicas y geométricas adecuadas, pero añadiendo una resistencia extra que permite resistir ensayos muy exigentes. La cabeza está formada por una carcasa hueca de aluminio, donde se aloja un acelerómetro. La caja torácica está formada por una serie de costillas de acero que responden como un pecho humano ante el impacto. La zona del abdomen está rellena de una espuma de poliuretano expandido que simula los distintos órganos internos. El cuello y la columna vertebral, presentan un comportamiento similar al de los órganos humanos, gracias a la utilización de elementos elásticos, de goma, intercalados con elementos metálicos, de aluminio, y todos ellos unidos por un cable metálico. La parte blanda del cuerpo, como puede ser la piel o los músculos, está compuesta en vinilo y espuma sintética. Estos elementos están contruidos para poder ser desprendidos fácilmente del dummy, y facilitar las tareas de mantenimiento, inspección o calibración [40] [41] [42].



Figura 3.33 – Detalle de la estructura interna del Hybrid III

Además de la versión más usada del individuo masculino de percentil 50%, existen otras versiones de Hybrid III [42] [44]:

- ◆ Hybrid III percentil 95%, masculino
- ◆ Hybrid III percentil 5%, femenino
- ◆ Hybrid III infantil 3 años
- ◆ Hybrid III infantil 6 años
- ◆ Hybrid III infantil 10 años

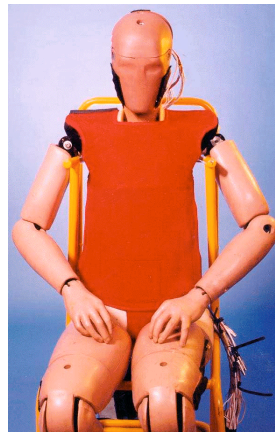
El dummy de percentil 95% representa a un individuo cuyas dimensiones y masa únicamente son superadas únicamente por el 5% de la población, es decir, es de gran tamaño. Por el contrario el de percentil 5%, representa un individuo cuyas dimensiones y masa son superadas por el 95% de la población [12].

#### **3.4.1.3.1.2 THOR**

THOR (Test device for Human Occupant Restraint) se trata del maniquí de ensayo frontal más avanzado construido hasta el momento. El THOR supera a su predecesor, Hybrid III, en aspectos como la biofidelidad y en la instrumentación. Su columna vertebral y la pelvis permite variar la posición del dummy sentado. Los sensores permiten transmitir información sobre las fuerzas ejercidas en la cara del dummy, con lo cual, es posible saber por primera vez las posibles lesiones que sufrirá la cara de la persona durante el impacto. Además de estos nuevos sensores, el THOR cuenta con mayor cantidad de sensores y más sensibilidad que los disponibles en el Hybrid III. Su tamaño equivale a un individuo masculino de percentil 50%.

THOR se ha construido bajo la dirección de la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration), y ha sido sometido a un proceso de validación internacional en el que han participado fabricantes de vehículos y centros de investigación americanos, japoneses y europeos, y que aún no ha sido finalizado.

Aunque por ahora no ha sido adoptado como maniquí de pruebas en ningún procedimiento de homologación de vehículos, parece que pronto se convertirá en el sustituto del Hybrid III.



**Figura 3.34 – Dummy THOR, Test device for Human Occupant Restraint**

En las siguientes tablas se muestran los datos de la masa de los segmentos del cuerpo, así como la localización y tipología de su instrumentación[43].

<b>Masa del segmento</b>	<b>Kg</b>
Cabeza	4.58
Cuello	1.65
Tórax	23.4
Pelvis	15.4
Pierna superior	7.6
Pierna inferior	3.8
Pie	0.95
Brazo superior	2.1
Brazo inferior	2.3
<i><b>TOTAL</b></i>	<b>78.3</b>

**Tabla 3.2 – Distribución de la masa del Thor en las diferentes partes del cuerpo**

<b>Tipo de sensor</b>	<b>Localización</b>	<b>Medida</b>
Acelerómetros conjunto (9)	en Cabeza	Aceleración lineal y angular
Células de carga (5)	Cara	Fuerza uniaxial en 5 posiciones de la cara
Célula de carga	Resorte posterior del cuello	Carga compresiva
Célula de carga	Resorte anterior del cuello	Carga compresiva
Célula de carga	Parte superior del cuello	Fuerza y momento en ejes x, y, z
Potenciómetro rotativo	Unión O-C	Ángulo entre la cabeza y cuello
Célula de carga	Parte inferior del cuello	Fuerza y momento en ejes x, y, z
Acelerómetro triaxial	Vértebra T1	Aceleración en ejes x, y, z
Acelerómetro triaxial	Centro de gravedad del tórax	Aceleración en ejes x, y, z
CRUX	Tórax	Deformación 3D de las costillas
Acelerómetro uniaxial	Abdomen superior	Penetración en el abdomen
Célula de carga	Vértebra T12	Fuerza y momento en ejes x, y, z
Acelerómetro triaxial	Centro de gravedad de la pelvis	Aceleración en ejes x, y, z
DGSP	Abdomen bajo	Deformación 3D en dos puntos del abdomen
Célula de carga	Cuenca pélvica	Fuerza acetabular izquierda en ejes x, y, z
Célula de carga	Cuenca pélvica	Fuerza acetabular derecha en ejes x, y, z
Célula de carga	Fémur izquierdo	Fuerza y momento en ejes x, y, z
Célula de carga	Fémur derecho	Fuerza y momento en ejes x, y, z

**Tabla 3.3 – Instrumentación del Thor**

En el siguiente cuadro se indican las principales diferencias entre estos dos dummies, el Hybrid III y THOR[50].

THOR	Hybrid III
Costillas antropométricas y orientadas como las del cuerpo humano. Costillas similares a las humanas con geometría de sección ovalada	Geometría de las costillas no similares a las humanas y con una mala orientación, hacia arriba
Sistema de medida de la deformación del pecho en 3D, mediante el empleo de sistemas de enlace de dos barras con potenciómetros de precisión de rotación	Sistema de medida de la deformación en el pecho de una sola dimensión a través de un potenciómetro.
Curvatura de la columna vertebral más parecida a la humana	Geometría de la columna vertebral antropométricamente incorrecta
Postura sentada ajustable mediante un mecanismo de cambio del ángulo de la columna	No tiene posibilidad de ajustar la postura sobre el asiento
Elementos elásticos y flexibles al nivel de las vértebras T5-T7	Columna vertebral simple y rígida
Célula de carga en la columna en el nivel T12 y L1	Célula de carga al nivel L5
Hombro mejorado con representación de la clavícula	Hombro sin clavícula
Caderas articuladas Pelvis caracterizada como la humana	Pelvis moldeada con forma de asiento
Cálculo de la deformación abdominal del abdomen en 3D	Parte blanda del abdomen de espuma y no instrumentalizada
Cuello con una biofidelidad de tres dimensiones	Cuellos con biofidelidad únicamente en impactos frontales
Cabeza con un perfil de la cara más suave y que incorpora el sensor de carga de la cara	Cara con rasgos humanos, aunque sin posibilidad de registrar la fuerza sobre ella
Fémur deformable con célula de carga de seis canales	Fémur rígido con célula de carga de seis canales

**Tabla 3.4 – Diferencias constructivas entre los dummies Hybrid III y Thor**

### 3.4.1.3.2 Dummies empleados en pruebas de impacto lateral

#### 3.4.1.3.2.1 SID

El SID (Side Impact Dummy) o maniquí de impacto lateral, como su propio nombre indica, es un dummy diseñado para la realización de las pruebas de choque lateral. Su especial diseño lo hace adecuado para mostrar los efectos de las colisiones laterales en las costillas, la columna vertebral y en los órganos internos, como el hígado o el bazo. El SID fue desarrollado a finales de los años 70 por la NHTSA. Es el dummy usado en los ensayos de homologación en Estados Unidos.

En Europa se creó el EuroSID, cuyas características son similares a las del SID americano. Es el dummy utilizado en Europa para realizar los ensayos de homologación de los automóviles nuevos.

Existe otro dummy de ensayo lateral, el BioSID. Es un diseño de General Motors, más avanzado que el del SID y EuroSID, pero no es usado para los ensayos oficiales de homologación.

Tanto el SID, EuroSID y el BioSID representan un individuo masculino de percentil 50%. Son fácilmente reconocibles entre otros dummies puesto que sus brazos sólo están completos hasta el codo.

La información que facilitan estos dummies es principalmente la aceleración de la columna vertebral y las costillas, además de la compresión en la caja torácica. Esta última medida es tomada como referencia para conocer posibles daños de los órganos internos.



**Figura 3.35 – SID (Side Impact Dummy)**



### 3.4.1.3.3 Dummy empleado en pruebas de impacto trasero

#### 3.4.1.3.3.1 *BioRID II*

Se trata de dummy de ensayo de impacto trasero, con el cual estudiar las lesiones de menor importancia causadas en el cuello, producidas en este tipo de colisiones, que en general son a baja velocidad. Este tipo de lesión es conocido como latigazo cervical o whiplash. El diseño de BioRID permite conocer con gran detalle el movimiento relativo de la cabeza y el torso. Para ello cuenta con una columna vertebral compuesta por 24 vértebras, similares a las reales, que permiten reproducir las distintas curvaturas de la espalda. De esta forma su comportamiento ante la colisión trasera es muy similar al de la espalda humana, y por tanto, ayudan a comprender las lesiones producidas en el latigazo cervical [51].

Fue desarrollado a finales de los años 90, entre otras entidades, por los fabricantes Volvo y Saab. El BioRID, que representa a un individuo masculino de percentil 50%, ha ayudado a mejorar elementos de seguridad pasiva como el reposacabezas o los asientos del automóvil, incorporando sistemas exclusivos para reducir la gravedad del posible latigazo cervical.

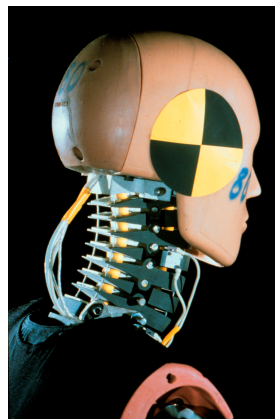


Figura 3.36 – BioRID II

#### **3.4.1.3.4 Dummies empleados en pruebas de atropello**

Tienen una gran importancia ya que se emplean para conocer las lesiones, la cinemática o las zonas de colisión cuando tiene lugar un atropello. Además permiten mejorar el conocimiento y evaluar las zonas de impacto en función de la velocidad y geometría del vehículo, en uno de los accidentes más comunes en zona urbana como es el atropello de peatones. Las pruebas diseñadas en las normas de homologación se basan en estadísticas, para representar las zonas del cuerpo más afectadas, pero realmente la información que se puede extraer de ellas es muy limitada. Los ensayos con los dummies y los datos de atropellos reales, sin duda ayudan a mejorar las normas de homologación ya que a partir de esta experiencia, los ensayos con impactadores pueden desarrollarse en mayor grado consiguiendo que el rango de accidentes que simulan sea lo más amplio posible.

Del mismo modo que con cualquier otro dummy, los utilizados en atropellos tienen una gran utilidad para ayudar a mejorar los modelos y simulaciones hechas por ordenador, permitiendo un mejor conocimiento de un fenómeno tan complejo como es un atropello.

### 3.4.1.3.4.1 HYBRID III PEDESTRIAN

La popularidad del dummy de choque Hybrid III y su uso mayoritario en todo el mundo ha hecho posible que algunos fabricantes desarrollen una versión de peatón o pedestrian, a pesar de que su diseño esté pensado para las pruebas de choque frontales. Básicamente, el Hybrid III Pedestrian es un Hybrid III modificado para poder adoptar la posición erguida necesaria para las pruebas de atropello. De hecho el fabricante de dummies DentonATD dispone en su catálogo de productos, tanto el Hybrid III Pedestrian, como el kit de conversión a peatón del Hybrid III estándar. Este kit incluye una nueva zona de la cadera articulada, un nuevo relleno abdominal, así como una nueva configuración para los anclajes de la columna vertebral [44].



Figura 3.37 – Versión Hybrid III Pedestrian percentil 50% y el kit de conversión simplificado

Puesto que la transformación de un Hybrid III estándar a uno de tipo peatón se realiza con un kit de piezas, además del Hybrid III de percentil 50% existen versiones pedestrian para otros miembros de la familia Hybrid III.

- ◆ Hybrid III Pedestrian percentil 95%, masculino
- ◆ Hybrid III Pedestrian percentil 5%, femenino
- ◆ Hybrid III Pedestrian infantil, 6 años

Las principales dimensiones del cuerpo del dummy Hybrid III, así como la masa de sus segmentos, pueden verse en la siguiente tabla.

[40] [42] [44]

<b>Masa del Segmento</b>	<b>Kg</b>	<b>Dimensión</b>	<b>cm</b>
Cabeza	5.54	Circunferencia Cabeza	59.7
Cuello	1.54	Anchura Cabeza	15.5
Torso superior	17.19	Longitud desde el hombro al codo	33.8
Torso inferior	23.04	Longitud desde el codo a la muñeca	29.7
Brazo y mano	4.27	Longitud desde el glúteo a la rodilla	59.2
Pierna superior	5.99	Altura de la rodilla	49.6
Pierna inferior y pie	5.44	Estatura sentado	88.4
<i><b>TOTAL</b></i>	77.70	Estatura total erguido	175

**Tabla 3.5 – Distribución de la masa del Hybrid III Pedestrian y algunas dimensiones**

En la tabla siguiente se especifica la ubicación de los sensores, además del tipo de magnitud medida y el número de canales [42].

Tipo de sensor	Localización	Medida
3 Acelerómetros en array	Cabeza	Aceleración lineal en ejes x, y, z
Célula de carga	Parte superior del cuello	Fuerza y momento en ejes x, y, z
Célula de carga	Parte inferior del cuello	Fuerza y momento en ejes x, y, z
Célula de carga	Clavícula	Fuerza en ejes x, z
Célula de carga	Húmero	Fuerza y momento en ejes x, y
3 Acelerómetros en array	Tórax	Aceleración lineal en ejes x, y, z
Medidor de desplazamiento	Tórax	Deformación lineal en eje x
Célula de carga	Costilla-Columna vertebral	Fuerza en eje x (2 por costilla. 12 total)
Célula de carga	Columna vertebral	Fuerza en ejes x, y, z. Momento en ejes x, y
Célula de carga	Espina lumbar	Fuerza en ejes x, z. Momento en eje y
3 Acelerómetro en array	Pelvis	Aceleración lineal en ejes x, y, z
Célula de carga	Fémur	Fuerza en eje x
Medidor de desplazamiento	Rodilla	Deformación lineal en eje x
Célula de carga	Rodilla	Fuerza en eje x
Célula de carga	Tibia superior	Momento en ejes x, y
Célula de carga	Tibia inferior	Fuerza en ejes y, z. Momento en eje x
Célula de carga	Tobillo	Fuerza y momento en ejes x, y, z
Célula de carga	Pie	Fuerza en eje x

**Tabla 3.6 – Instrumentación del Hybrid III**

El Hybrid III es un dummy cuyas cualidades son óptimas para la realización de ensayos de choque frontales, aunque su cuidada biofidelidad y completa instrumentación posibilita que pueda ser empleado en las pruebas de atropello, y que los datos recogidos en éstas sean de gran utilidad. Aunque tiene el inconveniente de que al ser diseñado para soportar grandes aceleraciones, en los crash tests, y no impactos directos como los soportados durante el atropello, algunas piezas o parte de la cubierta deban ser reemplazadas más habitualmente.

### 3.4.1.3.4.2 POLAR II

Polar II es en la actualidad el dummy peatón más empleado en el mundo en las pruebas de atropello. El primer modelo, el Polar I, fue creado en 1998 por el fabricante japonés Honda, convirtiéndose en el primer crash test dummy ideado para reproducir la cinemática de un cuerpo humano cuando tiene lugar un atropello. También permitía identificar las partes del vehículo que producían los daños al peatón, así como las partes del cuerpo humano que colisionaban con las diferentes zonas del vehículo, de modo que se pudiesen recopilar datos para mejorar las medidas tecnológicas de seguridad. Tras desarrollarse este primer modelo durante dos años, en el 2000 aparece el POLAR II, cuyo desarrollo fue realizado por Honda R&D Ltd con la colaboración de GESAC Inc. El objetivo de POLAR II fue el de mejorar las prestaciones ofrecidas por el modelo inicial, modificando el diseño en aquellos aspectos que fueron necesarios. Se mejoró la respuesta cinemática del cuerpo para que fuese más real, equipando además, diverso instrumental para poder conocer el nivel de lesiones producidos durante el atropello en ocho partes del cuerpo, incluidas el cuello y la cabeza [21] [22] [52].

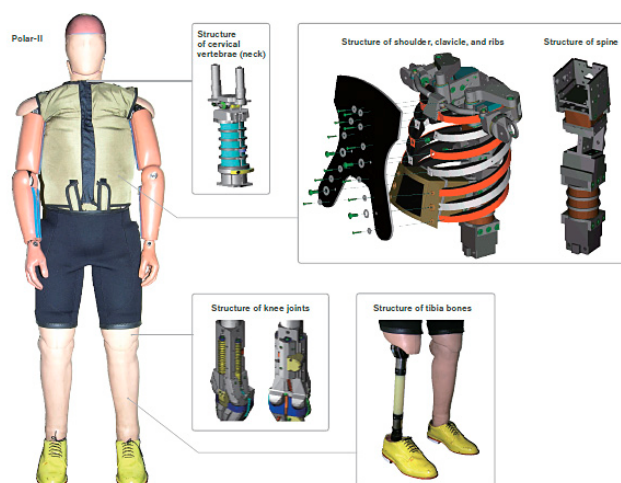


Figura 3.38 – Detalle tecnológico del Polar II

De la parte superior del cuerpo destaca la columna vertebral flexible, con hombros y caja torácica similar a la humana, incluyendo costillas y clavículas, con lo que se consigue una respuesta muy similar a la del cuerpo humano en caso de impacto. La musculatura cervical del cuerpo es simulada por una serie de cables y resortes. En la parte inferior del cuerpo, las extremidades, destaca el modelo de rodillas donde la función de los ligamentos cruzados es realizada por una serie de cables unidos a resortes. Los huesos largos de las piernas están realizados en resina, lo que proporciona cierta flexibilidad y reproducen las posibles roturas en caso de impacto.

Polar II representa a un individuo masculino de percentil 50%, cuyas principales dimensiones, y masas, de los segmentos de su cuerpo aparecen en las siguientes tablas y gráfico (*Sung-won Ko, 2001*) (*Crandall*).

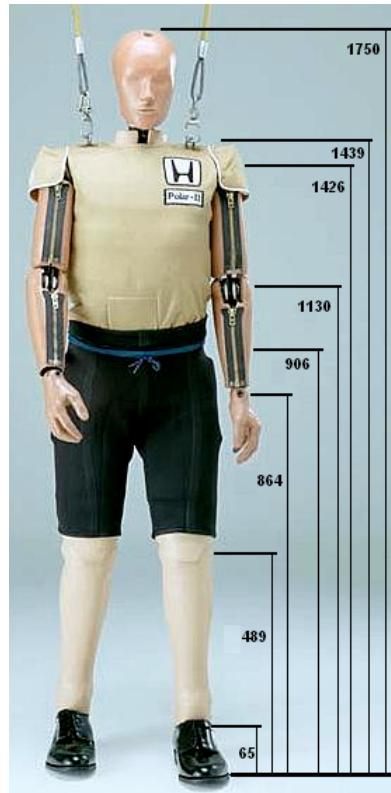


Figura 3.39 – Dimensiones del POLAR II

<b>POLAR II, percentil 50%</b>	
Masa total	75 Kg.
Estatura	175 cm.
Estatura en posición sentada	88.4 cm.
<b>Masa del Segmento</b>	<b>Kg</b>
Cabeza	4.85
Cuello	1.65
Tórax	23.4
Pelvis	15.2
Pierna Superior	7.6
Pierna Inferior	3.8
Pie	0.95
Brazo superior	2.1
Brazo inferior	2.3
<b>TOTAL</b>	<b>75</b>

Tabla 3.7 – Distribución de la masa del POLAR II

Respecto a la instrumentación, POLAR II consta de una gran cantidad de sensores distribuidos por todo el cuerpo con la finalidad de recopilar la mayor información posible durante y tras el atropello. En la tabla siguiente se muestra el tipo de sensor, su ubicación y la magnitud que mide [43]:

<b>Tipo de sensor</b>	<b>Localización</b>	<b>Medida</b>
Acelerómetros en array (9)	Cabeza	Aceleración lineal y angular
Células de carga (5)	Cara	Fuerza uniaxial en 5 posiciones de la cara
Célula de carga	Resorte posterior del cuello	Carga compresiva
Célula de carga	Resorte anterior del cuello	Carga compresiva
Célula de carga	Parte superior del cuello	Fuerza y momento en ejes x, y, z
Potenciómetro rotativo	Unión O-C	Ángulo entre la cabeza y cuello
Célula de carga	Parte inferior del cuello	Fuerza y momento en ejes x, y, z
Acelerómetro triaxial	Vértebra T1	Aceleración en ejes x, y, z
Acelerómetro triaxial	Centro de gravedad del tórax	Aceleración en ejes x, y, z
CRUX	Tórax	Deformación lateral de las costillas
Acelerómetro triaxial	Centro de gravedad de la pelvis	Aceleración en ejes x, y, z
DGSP	Abdomen bajo	Deformación lateral del abdomen
Célula de carga	Fémur izquierdo	Fuerza y momento en ejes x, y
Célula de carga	Fémur derecho	Fuerza y momento en ejes x, y
Célula de carga	Parte superior de la tibia	Fuerza y momento en ejes x, y
Célula de carga	Parte inferior de la tibia	Fuerza y momento en ejes x, y

**Tabla 3.8 – Instrumentación del POLAR II**



## POLAR III, la próxima generación de POLAR

Recientemente, en noviembre de 2008, Honda ha anunciado que ya ha completado las mejoras de su dummy específico para los ensayos de atropello, POLAR II, lo que supone la tercera generación de este moderno maniquí, el POLAR III [22].



Figura 3.40 – POLAR III

A pesar de que exteriormente ambas versiones presentan un aspecto similar, existen ciertas diferencias. Según explica el fabricante, Honda, la evolución se ha centrado en las extremidades inferiores ya que son las partes más vulnerables del cuerpo del peatón cuando colisiona con vehículos más altos, como son los SUV o furgonetas. Además, se han revisado los materiales y la forma exterior de algunas partes del cuerpo para que su respuesta sea más cercana a la de cuerpo humano.

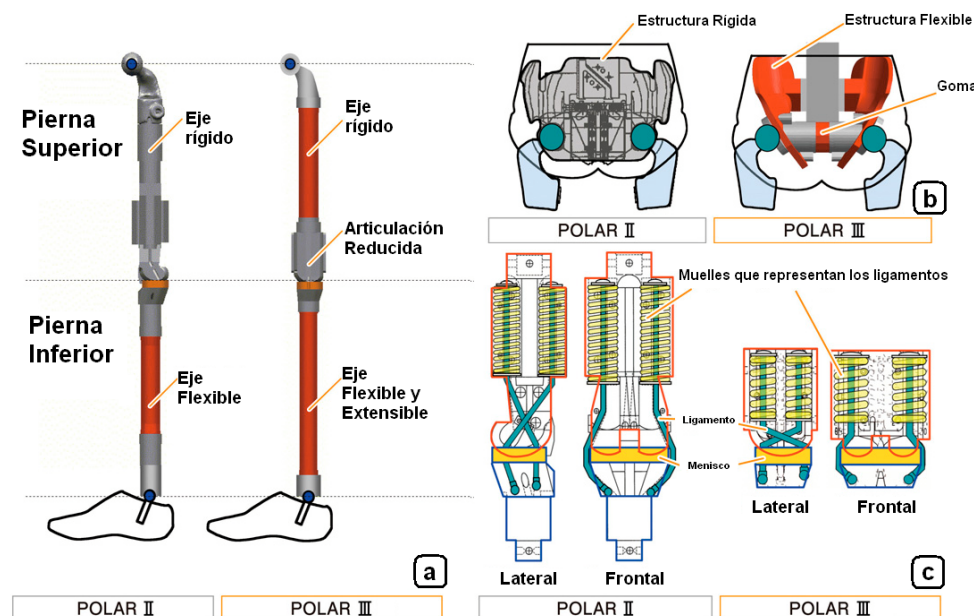


Figura 3.41 – Comparativa de los detalles constructivos de POLAR II y POLLAR III.  
a) Pierna b) Cadera c) Rodilla

Además de las piezas modificadas mostradas en la figura superior, también se han añadido nuevos sensores cuya función principal es la de registrar momentos de flexión, y carga en ligamentos y en huesos para poder evaluar sus posibles fracturas. El resto del cuerpo no ha sufrido cambios destacables.

## 3.5 SIMULACIÓN POR ORDENADOR

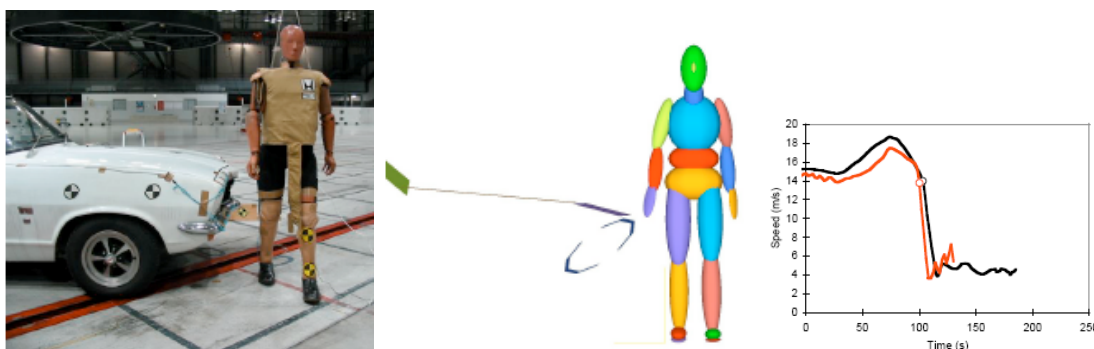
En la industria, las palabras como CAD, CAM o CAE, tienen tal importancia, que de no existir sería impensable una industria avanzada y en desarrollo como la actual. El diseño, la fabricación o la ingeniería asistida por ordenador se han convertido, entre otras, en herramientas utilizadas por ingenieros de todo el mundo y de todos los ámbitos imaginables. Se ha extendido tanto su uso que estas aplicaciones informáticas son de uso habitual, por ejemplo, para los ingenieros que diseñan juguetes o para aquellos que diseñan satélites espaciales. Las aplicaciones CAE, tal vez sean las más importantes ya que permiten realizar pruebas a los diseños de los elementos que componen una máquina, en las que se someten a las solicitaciones que deberán soportar durante su vida útil, para comprobar que cumplen con todas las especificaciones de diseño. En otros casos, estas solicitaciones se llevan al extremo para ver hasta qué nivel de sollicitación el elemento es capaz de resistir sin fallar.

Las ventajas que permiten la utilización de simulaciones hechas por ordenador en ingeniería tienen una mayor importancia si cabe, cuando éstas se utilizan para simular situaciones que requieren de mucho tiempo y suponen un alto coste, como son las pruebas de choque de vehículos, u otras pruebas de carácter destructivo. Los avances que cada día se producen en la informática, tanto en software como en hardware, está permitiendo que cada vez los programas de simulación sean más potentes, que puedan manejar una mayor cantidad de datos y que realicen los cálculos cada vez en menor tiempo. La consecuencia directa es que las simulaciones hechas por ordenador permiten simular la realidad considerando un mayor número de variables, disminuyendo el número de simplificaciones de los modelos matemáticos, y por tanto, que las diferencias entre el modelo virtual y el modelo real cada vez sean menores. De esta forma se reduce la distancia entre los resultados obtenidos mediante los ensayos reales de laboratorio y los ensayos realizados por ordenador.

En la actualidad, manteniéndose los plazos de entrega y la calidad, no podrían desarrollarse nuevos vehículos sin contar con la informática y sin los modelos de los vehículos empleados para simular, entre otras situaciones, los ensayos de choque. Con los modelos o simulaciones de ordenador, sobre todo, la fase de diseño de un producto se puede realizar de una manera más eficiente de forma que los plazos de entrega se reduzcan o el número de prototipos construidos sea el mínimo necesario para comprobar que el diseño virtual funciona correctamente, consiguiendo una reducción importante en los costes.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que para poder realizar los modelos matemáticos es necesario partir de los modelos reales y de los ensayos a los que son sometidos, ya que algo imprescindible en todo modelo virtual es su validación. Este

proceso de validación consiste en comparar los resultados obtenidos en el modelo de ordenador con los resultados del modelo real, y en función de las diferencias observadas decidir si el modelo es válido, o si debe ser mejorado. La validación de un modelo, más o menos complejo, puede considerarse como la fase más importante de su desarrollo, ya que de nada serviría si los resultados no tuviesen cierta correlación con la realidad. Tiene la misma importancia la validación de un modelo de viga en voladizo, que la validación de un complejo modelo de un vehículo que es sometido a un crash test, ya que si estos dos modelos no son válidos, en ambos casos no tendrían ninguna utilidad.

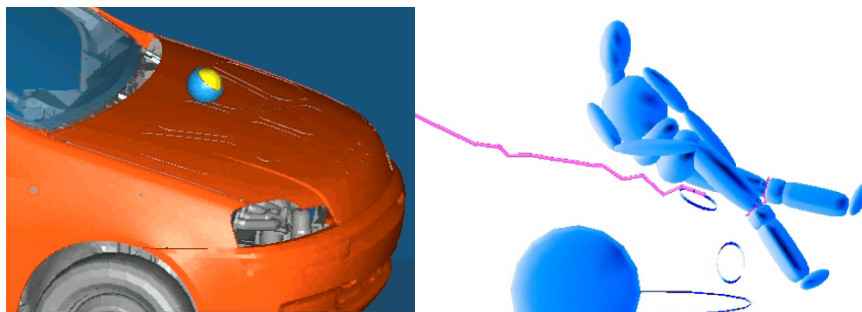


**Figura 3.42 – Ensayo de validación de un modelo de dummy sometido a un ensayo de atropello (Anderson)**

Los modelos hechos por ordenador permiten conseguir mayores avances en cualquier ámbito industrial, ya que es posible tomar medidas más arriesgadas e innovadoras durante la fase de diseño, puesto que si esa línea de investigación no resulta adecuada no tiene graves consecuencias en cuanto a tiempo empleado y coste. De la misma manera, un diseño deficiente puede detectarse antes de llegar a la fase de prototipos y puede ser modificado sin que este inconveniente tenga importantes consecuencias.

En el caso de los ensayos de atropello, la utilización de los modelos hechos por ordenador también permite conseguir todos los beneficios de la simulación, ya mencionados. Además, por tratarse de ensayos, en general destructivos, el empleo de estos modelos de simulación es de uso casi obligado antes de proceder a realizar las pruebas reales, para reducir el número de tests necesarios para confirmar el diseño del sistema puesto a prueba.

La versatilidad que ofrecen los programas CAE permiten simular tanto los ensayos de atropello basados en subsistemas, como los que son a escala real empleando dummies. En las siguientes figuras se incluyen algunos ejemplos de los ensayos realizados por ordenador.



**Figura 3.43 – Ejemplos de simulaciones de ensayos de atropello**

Otros programas empleados en la simulación de atropellos no pueden considerarse como CAE, y por tanto no poseen una gran versatilidad, aunque han sido específicamente creados para simular atropellos u otros accidentes de circulación y por tanto también hay que tenerlos muy en cuenta. En estos casos, por ser programas dedicados a la simulación de accidentes de tráfico la información que puede ser obtenida es más específica, y por esto, son unos de los más usados por las empresas dedicadas a la fabricación de vehículos, al desarrollo de sistemas de protección o laboratorios de investigación sobre seguridad en el automóvil.

### **3.5.1 Tipos de programas**

Es posible hacer una clasificación de los programas empleados en función del tipo de modelización empleada. Aunque los programas sean más o menos específicos para la simulación de atropellos, se pueden distinguir según usen uno o varios de los siguientes métodos de modelización:

- ♦ **Elementos Finitos (FE).** Este método consiste en tomar un elemento continuo y dividirlo, o discretizarlo, en un número finito de elementos. El comportamiento del elemento continuo se obtiene a partir de los parámetros asociados a los nodos, que son los puntos de unión de cada elemento adyacente en los que ha quedado dividido el elemento. De esta forma, es posible tratar el elemento completo a partir de las divisiones finitas como si se tratase de un elemento discreto. Resolviendo los sistemas de ecuaciones únicamente en el número limitado de nodos en los que ha quedado dividido el sistema completo, es posible resolverlo utilizando las denominadas funciones de forma. Estas funciones especifican de forma matemática el valor de los diferentes parámetros en cualquier punto dentro de un elemento, conociendo únicamente los valores en los nodos que lo delimitan. La utilización de estos modelos permite la resolución de modelos complejos realizando un mayor o menor número de simplificaciones geométricas, y empleando diferentes tipos y tamaños de los elementos en la discretización. Este método de modelización permite resultados de una gran exactitud, a costa de requerir un proceso de preparación o preprocesado largo y laborioso. Además, en general, el tiempo

de cálculo es prolongado y las necesidades computacionales son elevadas cuando se simulan sistemas muy complejos o altamente discretizados.

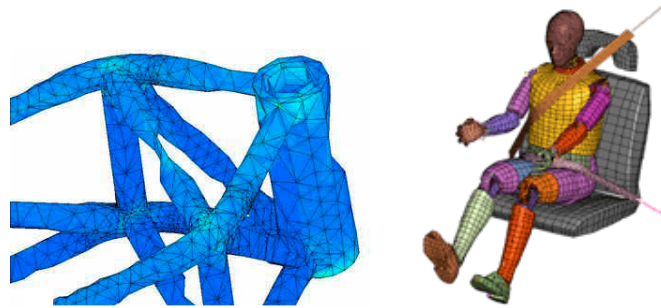
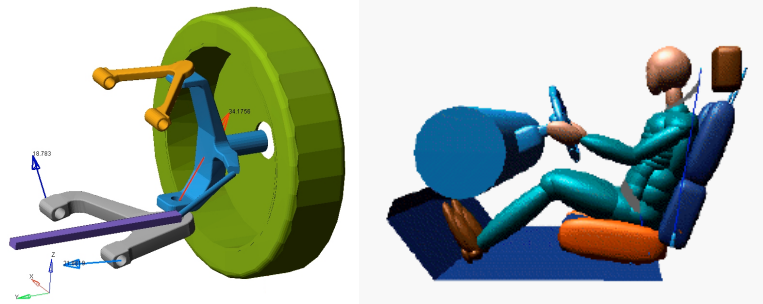


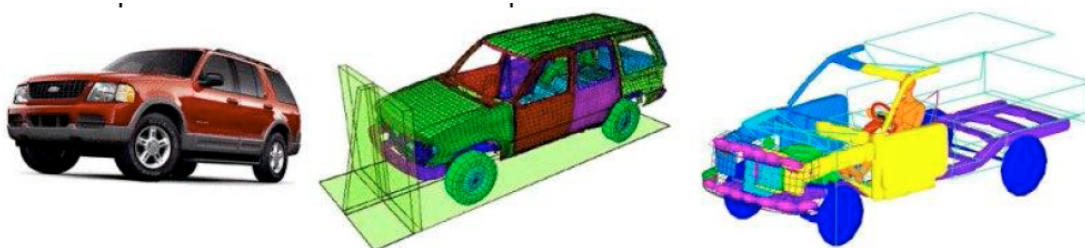
Figura 3.44 – Ejemplos de utilización de elementos finitos en simulación [58]

- ♦ **Multicuerpos.** La modelización utilizando multicuerpos consiste en la simplificación de un sistema más complejo dividiéndolo en cuerpos independientes, unidos entre sí mediante articulaciones. Estos cuerpos suelen ser elipsoides y, en general, se consideran como sólidos rígidos, cada uno de los cuales cuenta con una masa e inercia determinada. Otras propiedades de los cuerpos, como su rigidez (en caso de no considerarse perfectamente rígidos), o el coeficiente de restitución pueden definirse de forma independiente. Las articulaciones o uniones entre los diferentes cuerpos pueden ser esféricas, cilíndricas, lineales, universales, planas, de revolución, etc, pudiendo definirse el grado de resistencia al movimiento que ejerce la unión. Cada cuerpo está unido a otro a través de estas articulaciones, consiguiendo que el sistema multicuerpo posea un gran número de grados de libertad. Por esta razón, la posición y orientación de uno de los cuerpos del multicuerpo está relacionada con la posición y orientación del cuerpo adyacente ya que tienen un punto en común que suele corresponder con el centro de la articulación. El empleo de modelos multicuerpo puede considerarse también como una forma de discretizar un sistema continuo, aunque con esta operación en general se consigue una discretización menor. A pesar de ser modelos sencillos, la definición de las ecuaciones del movimiento y su resolución son procesos complejos. Debido a que los modelos multicuerpo son simplificaciones de sistemas más complejos se emplean en aplicaciones en las que los datos que permiten obtener, como son fuerzas de contacto, aceleración, velocidad o posición de los diferentes cuerpos sean suficiente. Aún así, teniendo en cuenta la limitación de los datos que pueden proporcionar, los modelos multicuerpo son muy utilizados ya que suponen una solución muy equilibrada entre exactitud de los resultados y tiempo de cálculo necesario. Como se verá, uno de los sistemas que más habitualmente se modela empleando multicuerpos es el cuerpo humano (*Naga, 2005*) (*Dhillon, 2007*) [59][60].



**Figura 3.45 – Ejemplos de utilización de multicuerpos en simulación [60] [61]**

En la Figura 3.46 puede verse la modelización de un vehículo real empleando el método de los elementos finitos y multicuerpos.



**Figura 3.46 – Modelización con elementos finitos y multicuerpos de un mismo sistema real**



### 3.5.2 Programas de simulación

A continuación se indican y se describen brevemente alguno de los programas más empleados en la simulación de los ensayos de atropello. Algunos son programas de simulación de propósito general usados en ingeniería, mientras que otros han sido desarrollados para este fin específico. Una cualidad que caracteriza a estos programas es la posibilidad de importar modelos de un software a otro con los cuales poder complementar las simulaciones. También pueden incluir módulos de los otros programas en su propio código para poder simular alguna situación en concreto. De esta forma es posible, mediante el empleo de un solo programa acceder a un mayor número de funciones que son propias de otros programas.

#### 3.5.2.1 MADYMO

Se trata del software de referencia de simulación en todas aquellas aplicaciones relacionadas con la seguridad en el automóvil y la protección de las personas. MADYMO es un producto de la empresa holandesa TASS (TNO Automotive Safety Solutions), cuyo nombre es el acrónimo de Mathematical Dynamic Models[62].

Se trata de un potente software que combina la posibilidad de realizar modelos de simulación usando el método de los elementos finitos o los multicuerpo, así como modelos mixtos empleando los dos métodos. Esto ha hecho que sea prácticamente el estándar utilizado en el análisis de la seguridad de los ocupantes de los vehículos de departamentos de ingeniería y estudios de diseño, laboratorios de investigación o universidades.

MADYMO dispone de una amplia biblioteca de elementos como barreras deformables, airbags y crash test dummies que pueden ser usados directamente en las simulaciones ya que han sido convenientemente validados a través de ensayos reales de laboratorio. El programa abarca todas las facetas de la seguridad en el automóvil en caso de impacto, como son los choques frontales, laterales, traseros o vuelcos, permitiendo realizar simulaciones de todos ellos. También permite la realización de ensayos en subsistemas de los vehículos como los airbags o los cinturones de seguridad, o de impactadores en ensayos de atropello.



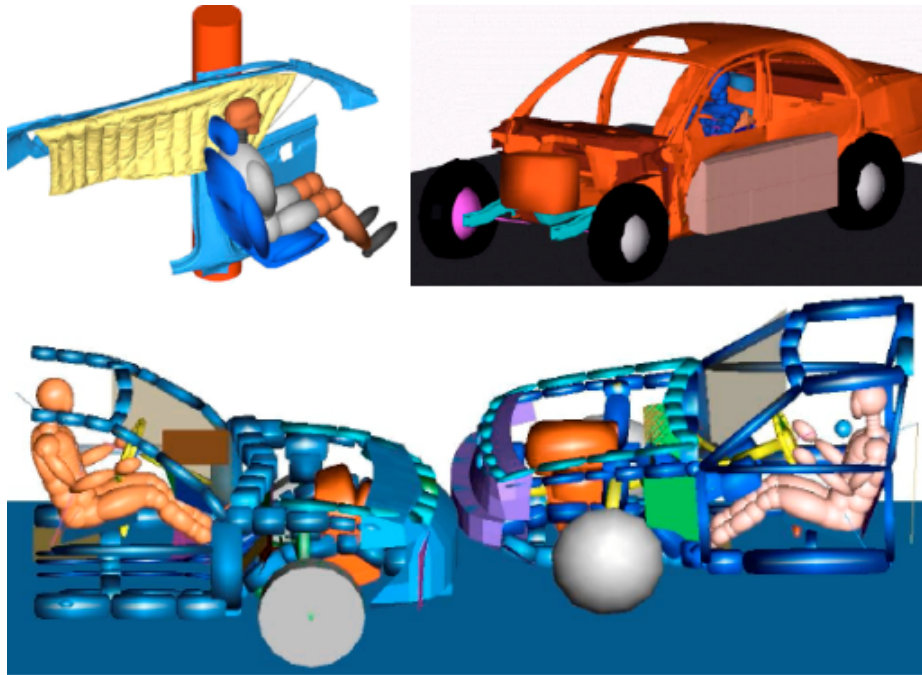


Figura 3.47 – Ejemplos del uso de MADYMO en simulaciones de crash test (*van der Zweep, 2005*)

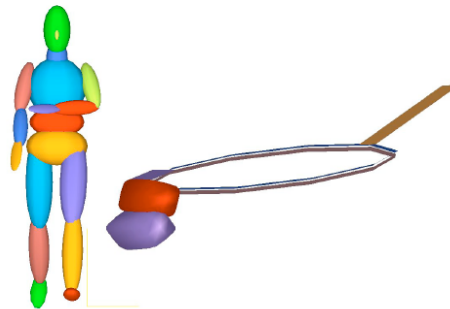
La base de datos de dummies de MADYMO está compuesta por más de 70 individuos, que cubren los diferentes tipos de crash test dummies utilizados en los ensayos, implementados tanto en multicuerpos como en elementos finitos. En las últimas versiones MADYMO incorpora un nuevo tipo de dummy, que consiste en un multicuerpo de formas suavizadas, en lugar de formado por elipsoides, que recibe el nombre de multicuerpo facetado. Estos nuevos dummies combinan las características de los multicuerpos y los elementos finitos, resultando un óptimo balance entre exactitud, estabilidad y velocidad de cálculo. Además permiten conocer mejor el contacto de los cuerpos con las diferentes partes del vehículo.



Figura 3.48 – Dummies desarrollados con MADYMO. a) Multicuerpos facetados. b) Multicuerpo de elipsoides (*van Hoof, 2006*) [63]

MADYMO permite realizar todo tipo de ensayos de atropello, tanto los basados en impactadores, los cuales están incluidos en la biblioteca de dummies, como los ensayos a escala real. Además de los dummies disponibles, como cualquier otro programa, permite crear nuevos dummies, tanto de elementos finitos como multicuerpos, o

modificar los ya existentes fácilmente. Esto, sumado a la posibilidad de obtener una gran cantidad de datos de las simulaciones, lo convierte en una de las herramientas de simulación más utilizadas para la simulación de atropellos. Por otra parte, MADYMO incorpora dentro de su postprocesador la posibilidad de obtener los principales índices de lesiones que se producen durante el ensayo, como es el HIC (Head Injury Criterion), con lo que se facilita el análisis de los resultados.



**Figura 3.49 – Ensayo de atropello utilizando multicuerpos realizado con MADYMO (Anderson)**

Otra de las grandes ventajas que presenta MADYMO es la posibilidad de acoplamiento con otros programas de simulación, como son LS-DYNA, RADIOSS o ABAQUS, PAMCRASH, y la incorporación de módulos incluidos en programas como PC-CRASH.

### 3.5.2.2 LS-DYNA

Se trata de un código de elementos finitos de propósito general desarrollado por la empresa LSTC (Livermore Software Technology Corp.) cuya sede central se encuentra en California (EEUU) [64] [65] [66].

Es un software muy completo que permite entre otras, las siguientes soluciones:

- ♦ Dinámica no lineal
- ♦ Dinámica de cuerpos rígidos
- ♦ Simulaciones cuasi-estáticas
- ♦ Modos normales
- ♦ Estática lineal
- ♦ Análisis térmico
- ♦ Análisis de fluidos
- ♦ Análisis de errores
- ♦ Propagación de fracturas
- ♦ Choque bajo líquidos
- ♦ Acústica en tiempo real
- ♦ Optimización de diseños
- ♦ Remallado adaptativo
- ♦ Hidrodinámica de partículas
- ♦ Acoplamiento térmico y estructural
- ♦ Compatibilidad con otros programas como Madymo

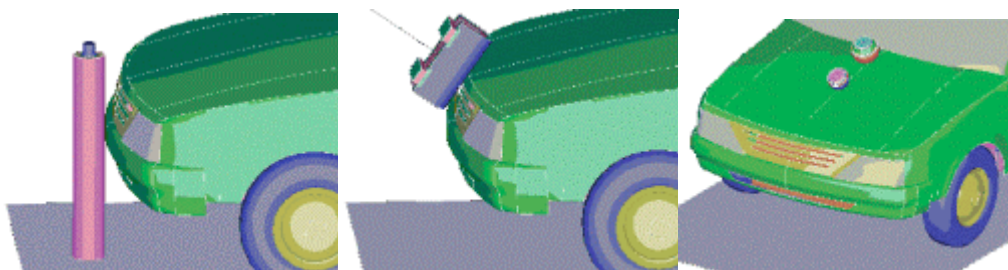
LS-DYNA es utilizado en una amplia variedad de industrias y aplicaciones como son por ejemplo:

- ◆ Formación de laminados metálicos, usado en estampación de metales, forja o hidroformación
- ◆ Industria aeroespacial, empleado en el análisis de fallos y diseño de perfiles.
- ◆ Defensa, utilizado para estudiar la penetración de proyectiles, explosivos, diseños de armas, etc.
- ◆ Ingeniería civil y de terremotos.
- ◆ Diseño de contenedores.
- ◆ Seguridad en el automóvil, usado para conocer el comportamiento del vehículo ante una colisión y el efecto sobre sus ocupantes, y para evaluar la protección de los peatones.

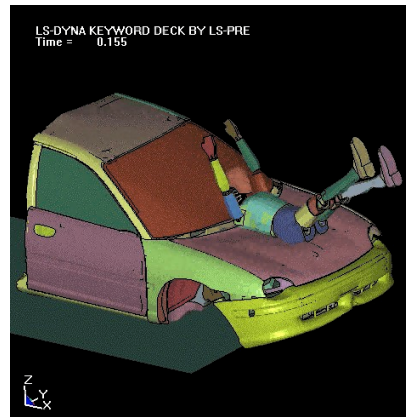
Dispone de librerías con diferentes tipos de materiales, o elementos para incluir en los diseños. Además dispone de un módulo específicamente creado para ser usado en aplicaciones de automoción donde se encuentran elementos que facilitan las simulaciones como son:

- ◆ Cinturones de seguridad
- ◆ Anillas
- ◆ Pretensores
- ◆ Retractores
- ◆ Sensores
- ◆ Acelerómetros
- ◆ Airbags
- ◆ Modelos de dummy, como el Hybrid III

Gracias a los módulos específicos y las posibilidades de adaptación del programa a multitud de aplicaciones es posible realizar simulaciones de los distintos tipos de ensayos de atropello, como son las pruebas basadas en impactadores o los atropellos a escala real. En las siguientes figuras se incluyen algunos de los ejemplos de la utilización de LS-DYNA como herramienta para simular diferentes ensayos de atropello.



**Figura 3.50 – Ensayos de atropello con impactadores realizado con LS-DYNA**



**Figura 3.51 – Ensayo de atropello a escala real realizado con LS-DYNA**

### 3.5.2.3 PAM-CRASH

Se trata de un programa de la empresa francesa ESI-GROUP, y puede ser considerado como la referencia entre los programas de simulación de pruebas de choque en el mundo. Decenas de fabricantes de automóviles usan este programa, basado en el método de los elementos finitos y sólidos, para reducir el ciclo de desarrollo de un nuevo modelo, al permitir prescindir de muchos ensayos de choque reales para poder validar el diseño [67].

Al no tratarse de un programa de propósito general, las únicas aplicaciones donde se utiliza es en aquellas relacionadas con la seguridad en caso de choque, aunque no sólo en el sector del automóvil, sino también en el aeroespacial, marítimo o en otro tipo de transporte terrestre como el tranvía o trolebús.

La especialización de este programa para ensayos de tipo crash, permite realizar de forma rápida y eficiente los diferentes tipos de crash test al disponer de bibliotecas con algunos de los elementos utilizados en las pruebas, como son las barreras deformables. A pesar de que la función principal de este programa es observar el comportamiento de la estructura del vehículo en caso de impacto, pudiendo detectar los posibles puntos de fallo, también puede usarse en el desarrollo de la seguridad del interior de los vehículos.



**Figura 3.52 – Ejemplo de aplicación de PAM-CRASH en la evaluación de la seguridad interior de un vehículo**

Con respecto a los ensayos de atropello, PAM-CRASH permite realizar los diferentes ensayos de atropello con impactadores.

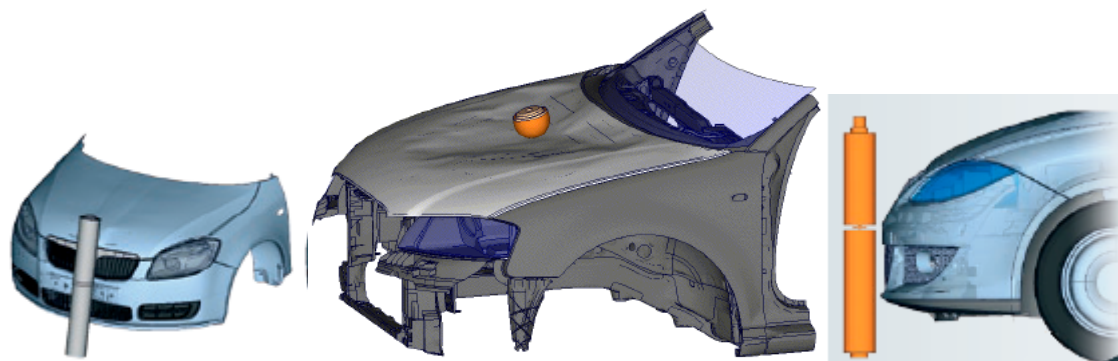


Figura 3.53 – Ensayos de atropello con impactadores realizado con PAM-CRASH [67]

#### 3.5.2.4 PC-CRASH

Se trata de un programa de reconstrucción de accidentes de tráfico de la empresa austríaca DSD [68][69]. Se trata de uno de los programas más empleados por los expertos en reconstrucción de accidentes de tráfico, como pueden los peritos de seguros o judiciales, miembros de Policía Local o el ERAT (Equipo de Reconstrucción de Accidentes de Tráfico) de la Guardia Civil. Mediante este programa es posible simular cualquier tipo de accidente de tráfico gracias a sus diferentes bases de datos de vehículos, y a la posibilidad de reproducir diferentes escenarios, tanto urbanos como de carretera. Además de emplear los vehículos, que son tratados como sólidos, el programa incorpora un módulo de multicuerpos. Esta característica aumenta las posibilidades de simulación, ya que permite una mejor modelización de los peatones y hace posible la simulación de atropellos con la garantía de obtener resultados válidos.

Gracias al módulo de tratamiento de multicuerpos es posible obtener un mayor número de parámetros, como resultado de las simulaciones, como son las posiciones, aceleraciones, velocidades o fuerzas de contacto sobre cada uno de los cuerpos del multicuerpo. Es posible la modificación de los multicuerpos incluidos en su biblioteca, o la creación de nuevos, que pueden ser usados en nuevas simulaciones.





Figura 3.54 – Ensayo de atropello utilizando multicuerpos, realizado con PC-CRASH

Una cualidad destacable de PC-CRASH es la inclusión de un módulo de MADYMO consistente en un conjunto formado por ocupante, asiento y sistema de retención, que puede ser combinado en los vehículos de las simulaciones para comprobar los posibles efectos del accidente en los ocupantes.

A pesar de que la principal aplicación de PC-CRASH es la simulación de colisiones entre vehículos para emplearse en la reconstrucción de accidentes, el empleo de los multicuerpos lo hace igual de válido para la simulación de atropellos de peatones, ciclistas o motociclistas. De hecho, el programa PC-CRASH y su módulo de multicuerpo ha superado con éxito las pruebas de validación de su modelo de peatón en pruebas de atropello (*Moser, 1999 y 2000*). A pesar de que MADYMO es la herramienta más utilizada para la simulación de atropellos, PC-CRASH ha demostrado que puede ser empleado también para este fin, obteniendo resultados globales cercanos a los de MADYMO (*Barrios*) (*Depriester*).



Figura 3.55 – Comparación de resultados entre MADYMO (arriba) y PC-CRASH (abajo)

Ya que PC-CRASH ha sido el programa usado para realizar las simulaciones de atropello en este Proyecto Fin de Carrera, sus características se tratan con más detalle en el siguiente Capítulo de este documento.

### **3.5.2.5 Otros programas**

Existen otros muchos programas que pueden ser usados para la simulación de ensayos de atropello, tanto de impactadores como de dummies. La mayoría son programas de elementos finitos de propósito general como por ejemplo:

- ◆ ABAQUS
- ◆ RADIOSS
- ◆ ADAMS
- ◆ ANSYS
- ◆ NASTRAN

O como el HVE que es otro software empleado en la reconstrucción de accidentes de tráfico.

## 4. SIMULACIÓN DE UN ATROPELLO

### 4.1 INTRODUCCIÓN

Cuando se aborda la idea de realizar una simulación por ordenador de un sistema, sea del tipo que sea, es necesario considerar diferentes aspectos antes de iniciar el proceso. Dependiendo de las decisiones tomadas para cada uno de los factores que intervienen en una simulación, un mismo sistema real puede ser modelizado y simulado de formas muy dispares, pudiendo ser todas ellas igual de válidas. Los principales aspectos que se han de considerar son:

- ♦ **Sistema a simular.** Es el primer paso antes de iniciar el proceso de simulación, puesto que en él se determina el sistema que va a ser modelado y los elementos que formarán parte del mismo.
- ♦ **Alcance de la simulación.** El siguiente aspecto a considerar es la información que se pretende obtener de la simulación. Éste es también un factor muy importante ya que de él depende, entre otras cosas, el método de modelización empleado en la simulación y el nivel de simplificación utilizado en el sistema completo, o en algunos de los elementos.
- ♦ **Programa utilizado.** A partir de las decisiones anteriores se selecciona, entre los diferentes programas disponibles, el más adecuado para realizar la simulación según ha sido definida. En ocasiones, el propio programa y sus características técnicas, y limitaciones, puede hacer que algunos de los aspectos de la simulación deban ser modificados para que ésta pueda llevarse a cabo sin problemas. En otras, la disponibilidad del programa es el factor más importante de los enunciados, influyendo en las decisiones sobre el sistema a simular y el alcance de la simulación.
- ♦ **Modelización de los elementos de la simulación.** En este último paso es donde se consideran los elementos que componen el sistema y cuya interacción es el objetivo principal de la simulación. Es posible destacar los elementos más importantes que aparecen en la mayoría de las simulaciones, como son el entorno, los elementos que interaccionan entre ellos y, en ocasiones, ciertas acciones externas aplicadas sobre el sistema.

En el caso de este Proyecto Fin de Carrera en el que se realiza la simulación de un atropello de un peatón, se ha particularizado cada uno de los aspectos referidos en el



párrafo anterior. En este caso la selección del programa de simulación elegido, PC-CRASH, se ha realizado teniendo en cuenta sus principales características y conociendo a priori el tipo de atropello que puede simular. Además, la elección del programa está justificada por tratarse de un programa conocido y que ha sido utilizado en el Departamento de Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid.

En los siguientes apartados de este capítulo del Proyecto se describe brevemente el programa PC-CRASH, analizando y describiendo de forma breve la modelización de los elementos que forman parte de las simulaciones realizadas.

## 4.2 PC-CRASH

El programa que se ha utilizado para realizar las simulaciones es PC-CRASH en su versión 8.0 (año 2007), cuyo principal uso se centra en la investigación y reconstrucción de accidentes de tráfico. Se trata de uno de los programas más completos y empleados como apoyo a las técnicas de reconstrucción de accidentes. Se basa en una interface gráfica, de ventanas y menús, que puede ser utilizado en una plataforma PC, ya que no requiere un hardware excesivamente potente. La entrada de datos es a través del ratón y teclado, no siendo posible la introducción de comandos escritos. Todo esto hace que su manejo pueda considerarse de sencillo, aunque para su dominio completo se requiere de cierto nivel de experiencia. En la Figura 4.1, se muestra la pantalla principal del programa.

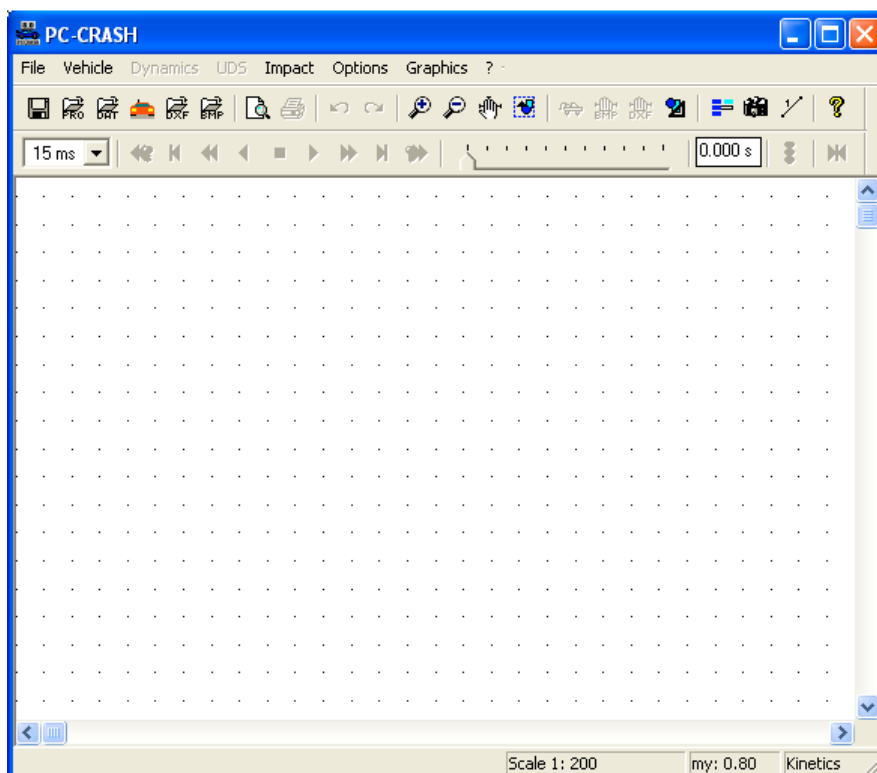


Figura 4.1 – Pantalla principal de PC-CRASH

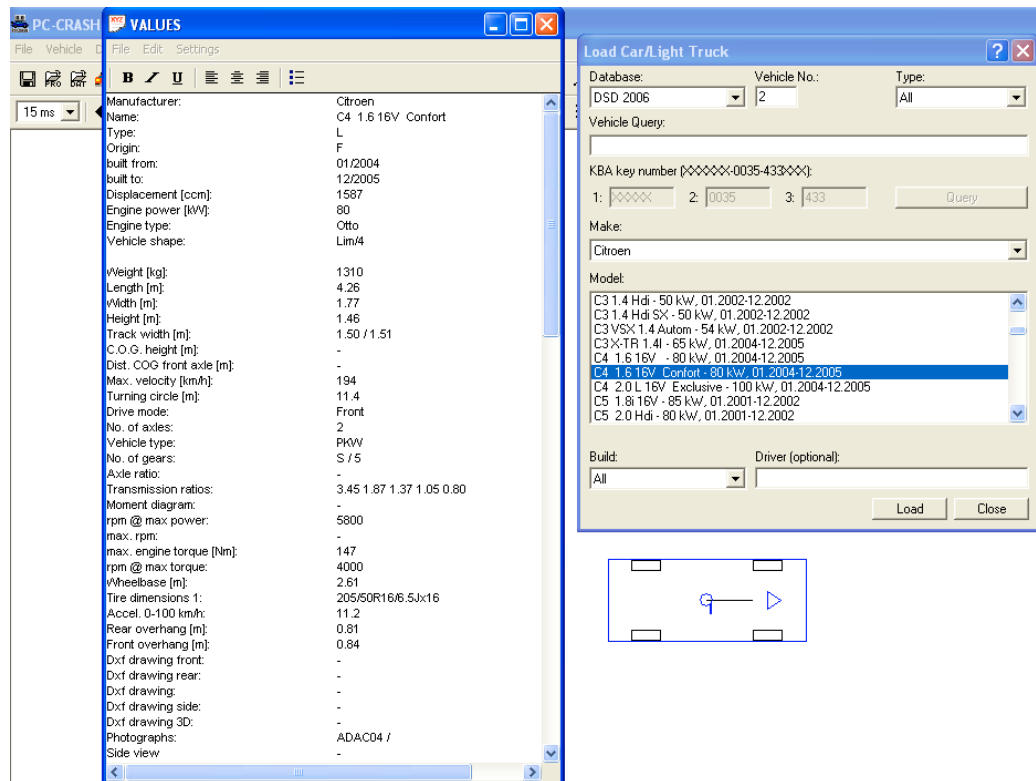
### 4.2.1 Características principales

El programa destaca porque trata la mayor parte de la información de forma gráfica, consiguiendo un mejor entendimiento de lo que sucede en cada momento, aunque también es posible obtener resultados en formato alfanumérico. PC-CRASH permite entre otras cosas:

- ◆ Simular posibles colisiones y estudiar sus efectos.
- ◆ Estudiar la visibilidad en accidentes supuestos o reales.
- ◆ Reconstruir la situación pre-impacto para el estudio de causas y responsabilidades en accidentes reales.
- ◆ Trabajar con las deformaciones post-impacto como dato o como resultado.
- ◆ Simular los efectos del accidente en pasajeros, peatones, ciclistas y motociclistas.
- ◆ Modificar las condiciones de visibilidad, mediante niebla o variación de la intensidad de la luz.
- ◆ Introducir elementos complejos en el entorno como son curvas, pendientes, peraltes o cunetas en las vías.

Para conseguir todo esto, PC-CRASH dispone de una extensa base de datos de vehículos con toda su información técnica, clasificados por tipo, marca y modelo. Los vehículos pueden situarse en diferente posición y orientación sobre el plano de trabajo, o en el espacio cuando se trabaja en tres dimensiones, asignando también un valor de

la velocidad inicial. Además, el programa permite introducir secuencias de acción (aceleración, frenada, evasión, etc.) o definir la trayectoria seguida por cada vehículo. Cuando existen varios vehículos en una simulación, los movimientos de estos pueden ser sincronizados independientemente, para conseguir que se produzca la colisión, o bien, para evitarla.



**Figura 4.2 – Ejemplo de la información técnica disponible para cada vehículo de la base de datos de PC-CRASH**

Los resultados de las simulaciones, pueden ser presentados de distintas formas:

- ♦ Salida gráfica de diferentes diagramas que relacionan magnitudes como velocidad o fuerza, con el tiempo o la distancia recorrida.
- ♦ Visualización en 2D de la simulación, desde la ventana principal del programa, con vista en planta. O bien, la visualización lateral en 2D.
- ♦ Visualización en 3D de la simulación en diferentes perspectivas, así como la posibilidad de exportarla en formato de vídeo.
- ♦ Obtención de los principales parámetros y datos de la simulación, en diferentes instantes de tiempo, en formato de texto, pudiendo ser exportados a cualquier otra aplicación.

Durante el proceso de simulación, que está descrito en el siguiente capítulo, se han realizado una serie de atropellos a peatones, basados en sistemas de tamaño real o completos, en los que el peatón es representado mediante un modelo específico.

Además del peatón, el sistema de cada simulación está compuesto por un entorno que puede ser configurado de diferente forma y un vehículo que también puede ser modificado en algunos de sus parámetros.

### 4.2.2 Modelización del entorno

La modelización del entorno en una simulación de un accidente de tráfico puede ser un factor muy influyente, ya que puede hacer que se produzcan resultados con una gran disparidad respecto de los que se obtendrían en un ensayo real. Cuando lo que se simula es un atropello, puede ser de gran interés incluir la mayoría de los elementos circundantes, que pueden interactuar con el peatón o el vehículo durante la simulación. En los casos de atropello urbano, es donde el escenario de la simulación puede incluir una mayor cantidad de elementos como pueden ser otros vehículos, mobiliario urbano, diversa señalización, árboles y otro tipo de vegetación, aceras y bordillos, etc. Además de los elementos que pueden ser incluidos para conseguir un entorno más o menos real, otro de los aspectos importantes es la superficie del terreno. Además de reproducir las irregularidades del terreno como la inclinación de la calzada, aceras, bordillos, cunetas, badenes o peraltes, es importante definir las características propias del suelo sobre el que se mueven el peatón y el vehículo implicados en el atropello.

En PC-CRASH el entorno puede ser definido de la siguiente forma:

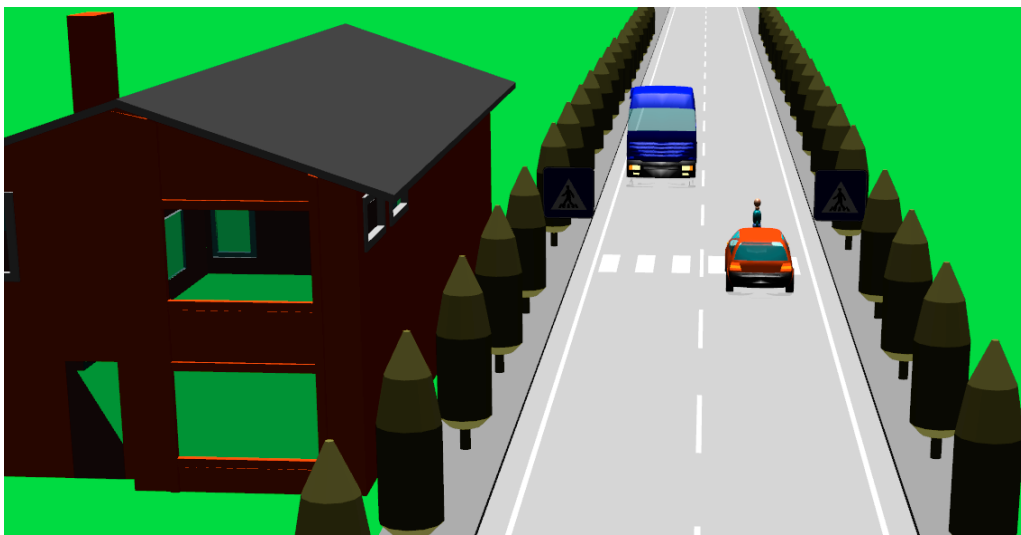


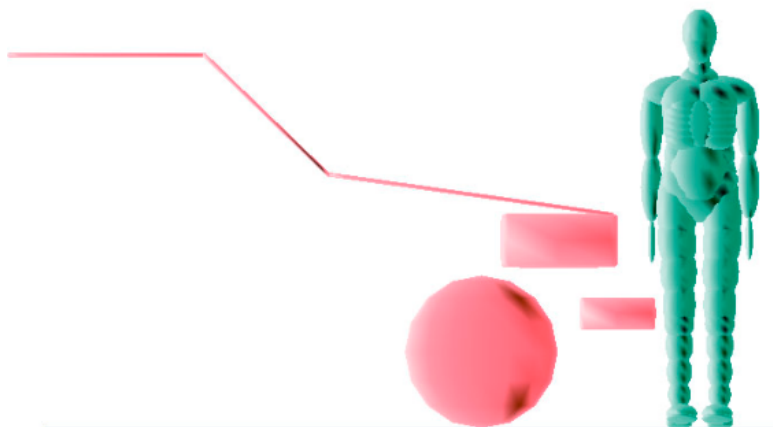
Figura 4.3 – Ejemplo de modelización de un entorno urbano con distintos elementos

- ♦ Es posible definir tramos de vía de diferente longitud y anchura, con un número variable de carriles, y con aceras a ambos lados.
- ♦ Permite incluir tramos de vía rectos, en curva o cruces, pudiendo definir diferentes pendientes, peraltes y cunetas.

- ♦ Incorpora la opción de modificar los coeficientes de fricción del suelo con los neumáticos o con los multicuerpos (peatones, por ejemplo), o de los multicuerpos con los vehículos. Además pueden definirse áreas sobre la vía con coeficientes de fricción variables, de forma que pueden simularse zonas con diferente adherencia, como pueden ser zonas mojadas o heladas.
- ♦ Además de poder incorporar señales y marcas viales, pueden incluirse objetos sólidos que no interactúan con los demás elementos, pero que sí modifican la visibilidad, como es la vegetación o los edificios.
- ♦ Es posible incluir otros vehículos inmóviles, o elementos deformables y rígidos, creados por el usuario, que pueden interaccionar con el resto de elementos del sistema.
- ♦ Pueden simularse diferentes condiciones ambientales y de luminosidad, como es niebla de intensidad variable o la posición e intensidad del sol.
- ♦ Existe la posibilidad de incluir y modificar la resistencia del viento en las simulaciones, modificando distintos parámetros.
- ♦ Permite insertar ficheros de dibujo de diferentes extensiones, además de incluir una herramienta de dibujo, con lo que es posible realizar el esquema del escenario del accidente.
- ♦ Dispone de la opción de insertar fotografías como fondo de la imagen con el fin de conseguir dar a la simulación un carácter más real, haciendo que los elementos del sistema se sitúen sobre las imágenes.

### 4.2.3 Modelización del vehículo

Las distintas formas posibles de modelizar un vehículo para realizar la simulación de un atropello se diferencian en el nivel de detalle considerado de su geometría. Dependiendo del objetivo de la simulación, puede definirse la geometría de vehículo sin apenas realizar simplificaciones, o bien considerar una geometría aproximada que ofrezca la suficiente información cuando el vehículo colisione con el peatón. En ocasiones, también es posible realizar un modelo de vehículo no completo, considerando únicamente el frontal del vehículo y el parabrisas, ya que éstas son en general, las zonas donde se localizan los principales impactos en un atropello. Cuando los vehículos se modelizan de forma muy simplificada, estos se generan empleando cuerpos rígidos o deformables, de geometría recta o curva.



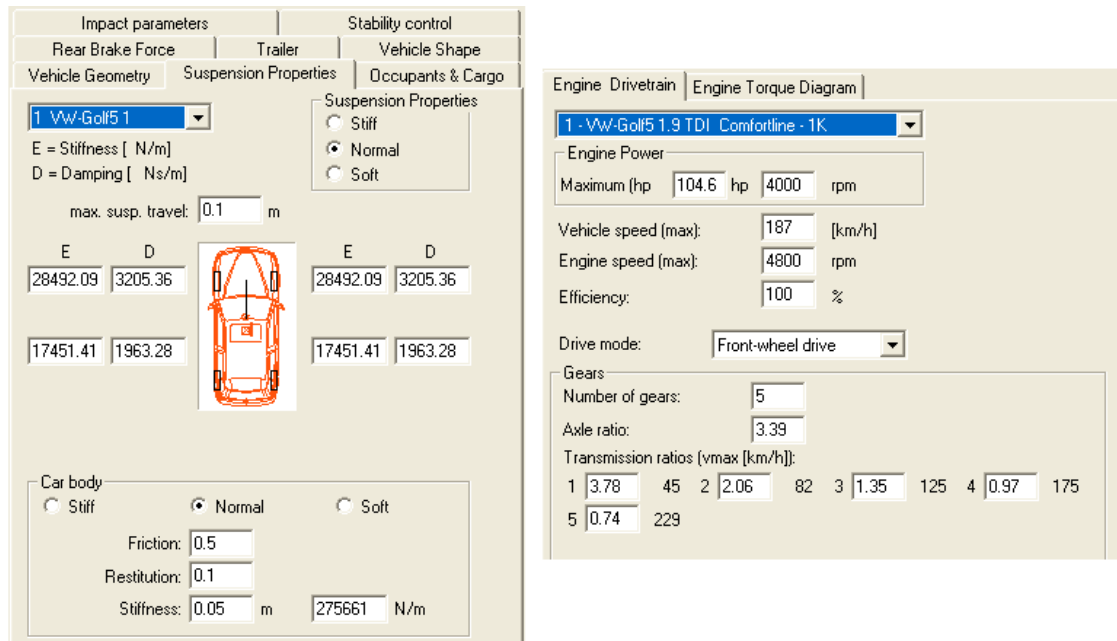
**Figura 4.4 – Modelo de simplificado de vehículo, realizado con MADYMO**

En PC-CRASH los vehículos con los que cuentan sus bases de datos, organizadas según distintos mercados mundiales, están modelizados en forma de sólidos rectilíneos, cuyas formas presentan una gran simplicidad respecto de la geometría real. Aún así, la geometría global de cada vehículo está perfectamente definida en sus cotas máximas de altura, anchura y longitud. Además de estas cotas generales, PC-CRASH permite modificar la geometría del vehículo considerada por defecto, de forma que el exterior del modelo pueda ser lo más parecido posible a su forma real. Existe también la posibilidad de crear las formas del vehículo en 3D, mediante programas de dibujo, y asociarlas a un vehículo, consiguiendo una geometría más detallada que el programa reconoce en caso de colisión.

Otro de los parámetros importantes en un vehículo, es su masa, y su reparto entre los distintos ejes del vehículo. De nuevo, los valores que PC-CRASH ofrece en sus bases de datos pueden ser modificados por el usuario. Otra de las opciones disponibles, es la posibilidad de incorporar a los vehículos un número variable de ocupantes, pudiendo definir sus masas, así como una masa adicional correspondiente a la carga que el vehículo puede transportar.

A partir de la geometría y la masa de los vehículos, PC-CRASH obtiene automáticamente los momentos de inercia, aunque también pueden ser introducidos manualmente. El programa también dispone de la opción de caracterizar el coeficiente de fricción y el de restitución de la carrocería, así como modificar la rigidez de la misma, de forma manual o según tres opciones predeterminadas.

Además de todas las posibilidades anteriores de configuración, PC-CRASH permite modificar otros sistemas del vehículo, usados preferentemente en otras aplicaciones sobre reconstrucción de accidentes de tráfico, como son: el modelo de rueda y contacto con el suelo, la suspensión, la distribución de la frenada y ABS, el control de estabilidad, o el motor y la transmisión.



The screenshot displays a vehicle configuration interface with two main panels. The left panel, titled 'Impact parameters', includes tabs for 'Rear Brake Force', 'Trailer', 'Vehicle Shape', 'Vehicle Geometry', 'Suspension Properties', and 'Occupants & Cargo'. The 'Vehicle Geometry' tab is active, showing a top-down view of a car with a red square indicating the impact point. Below this, there are input fields for 'E = Stiffness [N/m]' (28492.09) and 'D = Damping [Ns/m]' (3205.36), and a 'max. susp. travel' of 0.1 m. The 'Suspension Properties' section has radio buttons for 'Stiff', 'Normal' (selected), and 'Soft'. The 'Car body' section has radio buttons for 'Stiff', 'Normal' (selected), and 'Soft', with input fields for 'Friction' (0.5), 'Restitution' (0.1), and 'Stiffness' (0.05 m, 275661 N/m). The right panel, titled 'Engine Drivetrain', shows the 'Engine Torque Diagram' tab. It displays engine power (104.6 hp, 4000 rpm), vehicle speed (max: 187 km/h), engine speed (max: 4800 rpm), and efficiency (100%). The 'Drive mode' is set to 'Front-wheel drive'. The 'Gears' section shows the number of gears (5) and axle ratio (3.39). The 'Transmission ratios (vmax [km/h])' table is as follows:

Gear	1	2	3	4	5
Ratio	3.78	2.06	1.35	0.97	0.74
vmax [km/h]	45	82	125	175	229

Figura 4.5 – Menús de configuración de algunos de los sistemas del vehículo

## 4.2.4 Modelización del peatón

A pesar de los avances tecnológicos desarrollados durante los últimos años, la modelización de un cuerpo humano sigue siendo una tarea difícil debido a su extraordinaria complejidad. Sin embargo, la necesidad de usar modelos humanos en distintos ámbitos científicos, industriales o comerciales, ha hecho que se desarrollen modelos humanos más o menos complejos dependiendo de la aplicación requerida. En ocasiones son modelos tan simplificados que únicamente se trata de maniquíes rígidos con articulaciones simples cuya forma exterior se asemeja al cuerpo humano, como son los usados en sastrería o tiendas de ropa. Otros modelos con una mayor complejidad son los ya descritos, dummies, cuya apariencia exterior, propiedades geométricas y de masa, y comportamiento dinámico, los convierte en uno de los modelos de cuerpo humano más complejos. Por supuesto, existen otros muchos modelos en los que son otras características humanas las que se intentan reproducir, como son los empleados en medicina, que incorporan tejidos blandos, huesos, fluidos, etc. Dependiendo de la aplicación para la que sea necesario un modelo de cuerpo humano las simplificaciones se centran en un aspecto u otro, pero siempre es necesario un proceso de decisión sobre las simplificaciones oportunas en cada caso, ya que la elevada complejidad hace casi imposible conseguir un modelo similar en todos los aspectos al del cuerpo humano. Esta idea puede ser aplicada tanto para un modelo creado para ser usado en pruebas de laboratorio, como para un modelo de ordenador creado para ser empleado en simulación.

En el caso de las simulaciones de atropello donde se emplea un peatón, también la modelización puede ser más o menos compleja, dependiendo del programa empleado y la finalidad del ensayo, aunque lo más habitual es usar el modelo de un dummy o el de un cuerpo humano. La utilización como base para realizar el modelo de peatón de un dummy o un cuerpo humano, está relacionada con el procedimiento de validación de la simulación. Cuando la validación se realiza a partir de un ensayo con un dummy, el modelo creado para la simulación será el propio dummy, incorporando el modelo de forma intrínseca la mayoría de las simplificaciones propias del crash test dummy. Cuando, por el contrario, la validación no está sustentada en un ensayo con dummy, el modelo representa el cuerpo humano con el tipo de simplificaciones requeridas o consideradas en cada caso.

Uno de los métodos más usados en la modelización de los cuerpos humanos es el de los sistemas multicuerpos de tipo elipsoide. Debido a las características propias del ser humano resulta sencillo poder hacer una división de las diferentes partes del cuerpo, y gracias a las articulaciones y a la forma alargada de la mayoría de los huesos, es posible modelizar el cuerpo mediante elipsoides. Uno de los ejemplos más comunes y representativos de esta idea de simplificación del cuerpo, es el de los maniqués articulados empleados en dibujo o pintura.

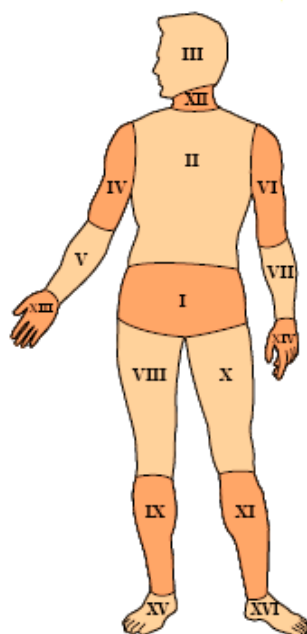


**Figura 4.6 – Maniquí articulado, ejemplo de segmentación del cuerpo humano en elipsoides**

La modelización de un cuerpo humano en elipsoides articulados o multicuerpo, puede realizarse considerando un número variable de segmentos, aunque en general el número es cercano a la veintena, puesto que en ocasiones algunos segmentos como las manos se desprecian. Independientemente del número de segmentos empleados, el modelo de peatón puede realizarse de forma individualizada, considerando un individuo a partir del cual crear el modelo, o bien emplear alguna base de datos antropométrica, donde se recogen de forma detallada los promedios de las distintas características corporales de una población en concreto. Los datos antropométricos recopilados son de gran utilidad en cualquier tipo de aplicación en la que el ser



humano participe, y en las que sea necesario conocer las dimensiones y peso del individuo que interactuará con el objeto o lugar. Estos datos son empleados por los diseñadores de ropa, ya que permiten ajustar el patronaje al sector de población al que va dirigido la prenda, o incluso para los diseñadores de vehículos, que deben crear un habitáculo interior que resulte cómodo para la mayoría de usuarios. Los datos antropométricos recopilados pueden servir también como base de estudios ergonómicos o biomecánicos con diferentes fines.



**Figura 4.7 – Ejemplo de división del cuerpo en distintos segmentos**

La recopilación de datos suele realizarse de forma cuidadosa y detallada, con protocolos de medición perfectamente definidos para que todas las mediciones puedan ser comparadas y procesadas. Algunas de las encuestas antropométricas realizadas por diferentes entidades, recogen únicamente determinadas mediciones como puede ser la longitud de los segmentos corporales, aunque otras de tipo más general, incluyen además de los datos sobre la masa y las longitudes del cuerpo, datos sobre la localización de las principales articulaciones y otros puntos singulares del cuerpo, información sobre perímetros corporales o los valores de inercia y centros de masa de cada segmento del cuerpo considerado (*Winter, 1990*) (*Jürgens, 1990*). Una de estas encuestas más completas es ANSUR (U.S. Army Anthropometric Survey) llevada a cabo por el ejército de Estados Unidos en 1988 y que recoge alrededor de 250 valores directos, y derivados, de cerca de 4000 miembros de las fuerzas armadas.

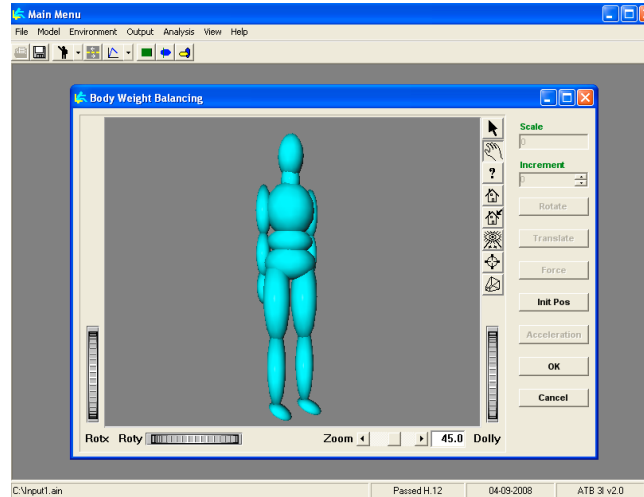
Segmento corporal	Longitud [m]	Masa [kg]	Posición del c.d.m [m]		
			Sagital	Transversal	Longitudinal
Cabeza	0.2722	5.8347	0.0000	0.0000	0.1361
Tronco	0.7667	36.5380	0.0144	0.0000	0.3216
Tórax	0.2500	13.4180	0.0100	0.0000	0.1167
Abdomen	0.3278	13.7291	0.0150	0.0000	0.2223
Pelvis	0.1889	9.3909	0.0200	0.0000	0.0345
Brazo	0.3444	2.2784	0.0000	0.0000	-0.1988
Antebrazo	0.3222	1.3620	0.0000	0.0000	-0.1474
Mano	0.2111	0.5128	0.0000	0.0000	-0.0779
Muslo	0.4556	11.9047	0.0000	0.0000	-0.2275
Pantorrilla	0.4389	3.6404	0.0000	0.0000	-0.1957
Pie	0.2800	1.1518	0.0420	0.0000	-0.0684

Segmento corporal	Radio de giro [m]			Momentos de inercia [kg m <sup>2</sup> ]		
	Sagital	Transversal	Longitudinal	I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>
Cabeza	0.0825	0.0856	0.0711	0.0397	0.0428	0.0295
Tronco	0.2852	0.2660	0.1464	2.9720	2.5859	0.7835
Tórax	0.1790	0.1135	0.1647	0.4299	0.1729	0.03642
Abdomen	0.1580	0.1255	0.1534	0.3427	0.2164	0.3231
Pelvis	0.1162	0.1041	0.1109	0.1267	0.1017	0.1155
Brazo	0.0982	0.0927	0.0544	0.0220	0.0196	0.0067
Antebrazo	0.0889	0.0854	0.0390	0.0108	0.0099	0.0021
Mano	0.1326	0.1083	0.0847	0.0090	0.0060	0.0037
Muslo	0.1828	0.1828	0.0828	0.3977	0.3977	0.0816
Pantorrilla	0.1119	0.1093	0.0452	0.0456	0.0435	0.0074
Pie	0.0720	0.0686	0.0347	0.0060	0.0054	0.0014

Tabla 4.1 – Ejemplo de valores antropométricos correspondiente a un individuo masculino medio de 84kg. y 1.90 m. (Rodíc)

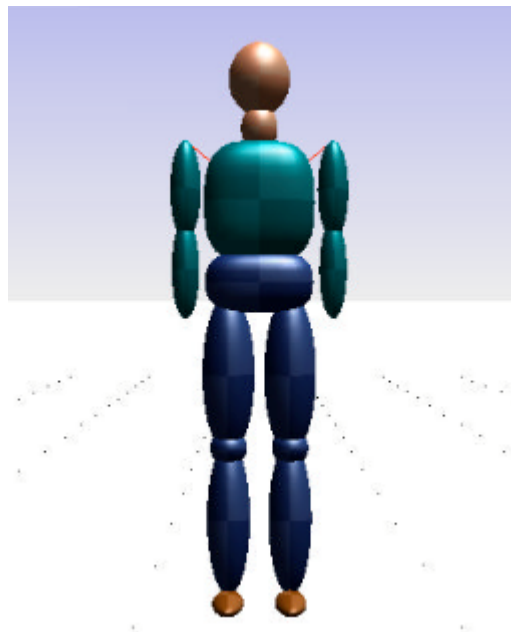
Gracias a la recopilación de estos datos, es posible obtener, sólo a partir del valor de la altura y la masa, toda la geometría de un sujeto que se ajuste al tamaño y sexo elegido. Esta posibilidad está disponible en algunos programas informáticos, como es el caso de GEBOD (Generator of Body Data), desarrollado por el Laboratorio de Investigación de las Fuerzas Aéreas de Estados Unidos (AFRL) [70], a partir de una toma de datos de 2420 individuos. Se trata de uno de los programas más conocidos y empleados, con el cual es posible generar un modelo multicuerpo de elipsoides de características humanas, definiendo los valores globales de estatura y masa del individuo, o bien, definiendo de forma independiente cada segmento. El multicuerpo

GEBOD está formado por 17 segmentos, obtenido a partir de 32 dimensiones y otros valores, como son la localización de articulaciones, o las propiedades másicas y de inercia. El ya citado programa de simulación MADYMO, es uno de los programas que integran GEBOD para generar modelos humanos usados en sus simulaciones.



**Figura 4.8 – Modelo humano de 1,75 m. y 75 kg. creado con GEBOD, implementado en el programa ATB3I de General Dynamics**

Entre las características que posee PC-CRASH, se encuentra la opción de poder incorporar a las simulaciones los sistemas multicuerpos, bien importando alguno de los incluidos en una biblioteca específica del programa, o bien, siendo creados por el propio usuario. Entre los distintos sistemas multicuerpo incluidos en PC-CRASH, destaca el modelo de peatón, creado en 2006 y que ha sido puesto a prueba, superando con éxito el necesario proceso de validación (*Moser, 1999 y 2000*).



**Figura 4.9 – Modelo multicuerpo de peatón de PC-CRASH**

Como se puede ver en la Figura 4.9, el modelo de peatón que emplea PC-CRASH es un multicuerpo generado a partir de diferentes elipsoides. El modelo presenta un alto nivel de simplificación geométrica, pero a la vez permite obtener resultados con un alto grado de similitud con la respuesta del cuerpo humano ante un atropello, manteniendo un equilibrio con la estabilidad del programa y el tiempo de cálculo necesario [59]. El cuerpo está formado por 20 segmentos unidos entre sí mediante 19 articulaciones, que pueden ser modificados a través de un menú dedicado a los sistemas multicuerpos. Según el manual técnico de PC-CRASH en las extremidades inferiores del peatón se emplean dos tipos de cuerpos, unos en forma de elipsoide alargados (que son los que pueden verse) y otros en forma de elipsoides esféricos. Estos últimos están situados aproximadamente en el centro de gravedad de lo que puede asimilarse como muslo y pantorrilla, cuentan con una masa de 1 Kg, y se emplean para conocer las fuerzas de contacto con el vehículo de forma más precisa. Por el contrario, los elipsoides de forma más alargada cuentan con una masa total correspondiente a la del segmento corporal que representan, y con ellos es posible conocer la fuerza de impacto que se produce con la parte delantera, o parachoques, del vehículo, o en cualquier otro contacto.

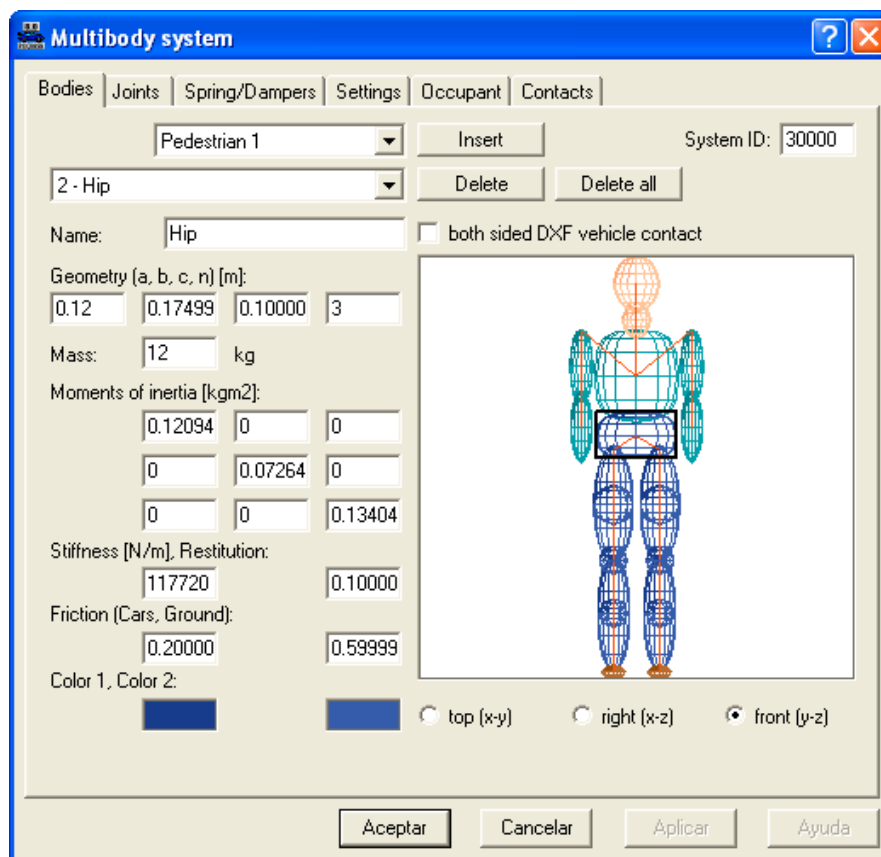


Figura 4.10 – Menú de configuración de los sistemas multicuerpo

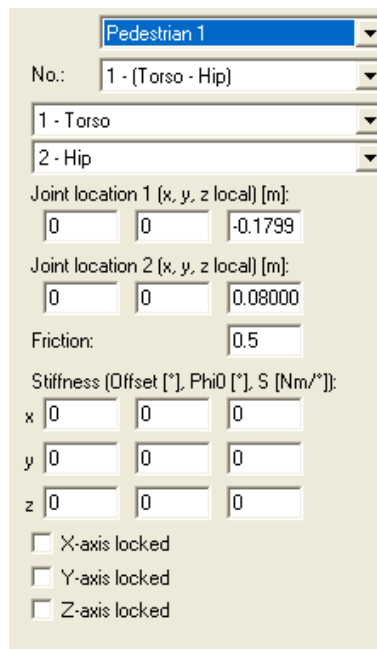
Como puede verse en la figura superior, el menú del sistema multicuerpo dispone de varias pestañas, cada una de las cuales permite acceder a distintas opciones de configuración y modificación. En la dedicada a los cuerpos ("bodies") es donde

aparecen todas las propiedades de cada cuerpo, que pueden ser modificados de forma independiente. Las distintas opciones de modificación son las siguientes:

- ◆ Nombre.
- ◆ Geometría.
- ◆ Masa.
- ◆ Momentos de inercia. Cuando se modifica alguno de los valores geométricos o de masa, el programa permite calcular automáticamente los nuevos momentos de inercia del cuerpo.
- ◆ Rigidez y Coeficiente de restitución.
- ◆ Coeficiente de fricción con el suelo y los vehículos.
- ◆ Color.

En esta misma pantalla es posible insertar nuevos cuerpos, así como eliminar otros.

En la siguiente pestaña, dedicada a las uniones ("joints") entre los diferentes cuerpos, es posible crear nuevas uniones, de tipo articulación esférica, así como eliminar las existentes. También permite situar el punto de unión respecto de cada cuerpo interconectados, además de poder indicar la fricción que hay entre ambos segmentos. En la configuración por defecto del peatón, todas las uniones carecen de rigidez, aunque ésta puede ser modificada según los tres ejes (x, y, z). Incluye la opción de crear uniones rígidas, bloqueando los giros según los tres ejes coordinados.



Pedestrian 1

No.: 1 - (Torso - Hip)

1 - Torso

2 - Hip

Joint location 1 (x, y, z local) [m]:

0 0 -0.1799

Joint location 2 (x, y, z local) [m]:

0 0 0.08000

Friction: 0.5

Stiffness (Offset [°], Phi0 [°], S [Nm/°]):

x 0 0 0

y 0 0 0

z 0 0 0

☐ X-axis locked

☐ Y-axis locked

☐ Z-axis locked

**Figura 4.11 – Detalle de las opciones de configuración de las uniones entre cuerpos**

La pestaña dedicada a resortes y amortiguadores ("Spring/Dampers") permite añadir este tipo de elementos entre los diferentes segmentos del cuerpo del peatón, de forma que se consiga un comportamiento distinto. Existe la opción de definir las

características de los resortes y de los amortiguadores, tanto lineales como rotatorios, además de poder indicar los puntos de anclaje de estos elementos sobre los cuerpos. El modelo de peatón incluido en el programa, no incorpora ninguno de estos elementos por defecto.

La pestaña siguiente de ajustes ("settings"), hace referencia a dos aspectos muy importantes. Por un lado permite modificar la posición y orientación de cada cuerpo de forma independiente, o cambiar la configuración del peatón completo. Además, incluye dos submenús de opciones. En ellos es posible modificar las propiedades de masa o longitud de cada segmento de forma individual, o las del peatón de forma global, además de poder variar los coeficientes de fricción y restitución. PC-CRASH incorpora una base de datos semejante a la de GEBOD ("International Data on Anthropometry" Jürgens, Auner y Pieper), con la cual es posible definir las características morfológicas del peatón indicando únicamente el valor de la masa y la estatura. Gracias a esta característica, permite crear un peatón completo y operativo, de diferente masa o estatura, de forma rápida y sencilla.

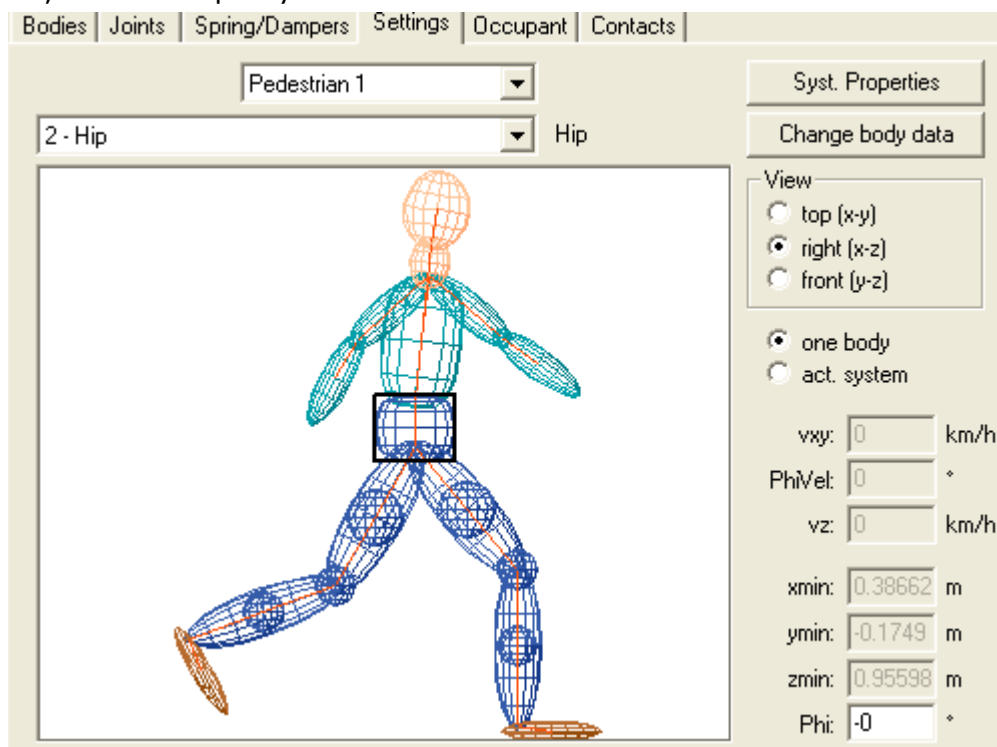


Figura 4.12 – Ejemplo de modificación de la postura del peatón a través del menú de multicuerpos

Por último, en la pestaña referida como contactos ("contacts"), es posible determinar para cada segmento del cuerpo de forma independiente, el contacto o no, con los demás cuerpos del sistema multicuerpo.

Aunque en este capítulo se ha realizado una descripción general de las características del modelo de peatón empleado en las simulaciones, en el Capítulo 5 dedicada a éstas, se indican con más detalle alguno de los aspectos del peatón multicuerpo utilizado.

## 5. PARTE EXPERIMENTAL

### 5.1 INTRODUCCIÓN

Además de los aspectos tratados en los anteriores Capítulos de este documento, en este Proyecto Fin de Carrera la parte experimental basada en simulaciones realizadas por ordenador, tiene una gran importancia, ya que gracias a ella es posible completar toda la información incluida acerca de los atropellos de peatones.

Durante todo este proceso se han llevado a cabo diversas simulaciones, empleando para ellas el ya descrito programa PC-CRASH, en las cuales se reproduce un atropello simple, en el que se ven involucrados un vehículo y un peatón. Modificando los distintos elementos que intervienen en el sistema, además de la situación espacial y las condiciones de las simulaciones se ha podido abarcar un amplio número de situaciones distintas, a partir de las cuales se han obtenido diferentes datos. Los vehículos empleados en las simulaciones es uno de los aspectos destacados de esta parte experimental, ya que se han considerado seis vehículos diferentes, pertenecientes a categorías distintas con la intención de poder evaluar la influencia que tienen las características propias de cada vehículo en los resultados de los atropellos.

Las simulaciones se han realizado buscando dos objetivos diferentes. Por un lado, se ha llevado a cabo un primer bloque de simulaciones empleando los distintos vehículos modelizados, modificando las condiciones iniciales con la intención de poder observar y analizar los movimientos del peatón tras ser atropellado, a diferentes velocidades. A partir de ahí, se ha realizado una clasificación de los ensayos según las cinco tipologías teóricas de atropello que son consideradas habitualmente. Con esto se ha podido conocer de forma experimental si la geometría o la velocidad del vehículo influyen en los resultados de las simulaciones, haciendo posible o impidiendo, que alguna de estas tipologías puedan ser observadas en los distintos atropellos. El otro bloque de simulaciones, se ha dedicado a conocer de una forma aproximada y relativa, el posible daño que puede sufrir un peatón cuando es víctima de un atropello a una determinada velocidad. Para ello se han realizado diferentes simulaciones, empleando los mismos seis vehículos y considerando el mismo modelo de peatón, aunque en distintas posiciones. Puesto que lo que se pretende es poder analizar y comparar el daño sufrido por un mismo peatón cuando es atropellado por diferentes vehículos a una misma velocidad, ésta se ha fijado en 50 km/h. Para conocer el daño, se han considerado los resultados de diferentes parámetros registrados en el cuerpo del peatón. A partir de estos, se han comparado y se ha podido ver en caso de atropello, qué vehículo puede

causar mayor daño en el peatón y en qué parte de su cuerpo, además de observar si existen otros factores que pueden influir en los resultados.

Ya que en la parte experimental se han realizado simulaciones persiguiendo dos objetivos bien diferenciados, cada uno de ellos se trata en dos apartados independientes, cuyos títulos son los siguientes:

- ♦ *Determinación de la tipología de atropello según el tipo de vehículo y velocidad.*
- ♦ *Determinación del daño sufrido por un peatón en un atropello a 50 km/h.*

Previamente a estos dos apartados, se dedica un tercero a explicar brevemente los pasos previos necesarios realizados antes de comenzar la fase de simulación, donde entre otras cosas se indican los vehículos finalmente considerados y el proceso de modelización llevado a cabo.



## 5.2 PREPARACIÓN DE LAS SIMULACIONES

Antes de afrontar cualquiera de las simulaciones es necesario realizar un proceso previo de preparación del programa PC-CRASH con el fin de que todos los resultados obtenidos puedan ser utilizados, y comparados entre ellos. Se trata de un proceso sencillo, en el que principalmente se consigue una configuración del programa, que podría definirse como *configuración base*, que define como serán todas las simulaciones, de la primera a la última. Esta configuración básica afecta principalmente a los parámetros de simulación, la preparación del entorno de las simulaciones, los vehículos empleados y el modelo de peatón.

### 5.2.1 Definición de los parámetros básicos de simulación

En PC-CRASH existen únicamente dos menús de opciones que se aplican a situaciones en las que sólo aparece un vehículo, como es el caso de un caso de atropello. Cuando se simulan colisiones entre vehículos, el programa permite definir una mayor cantidad de parámetros que condicionan las simulaciones y sus resultados.

El primer menú, Opciones ("Options"), incluye una serie de opciones generales del programa, que pueden ser enumeradas de la siguiente forma:

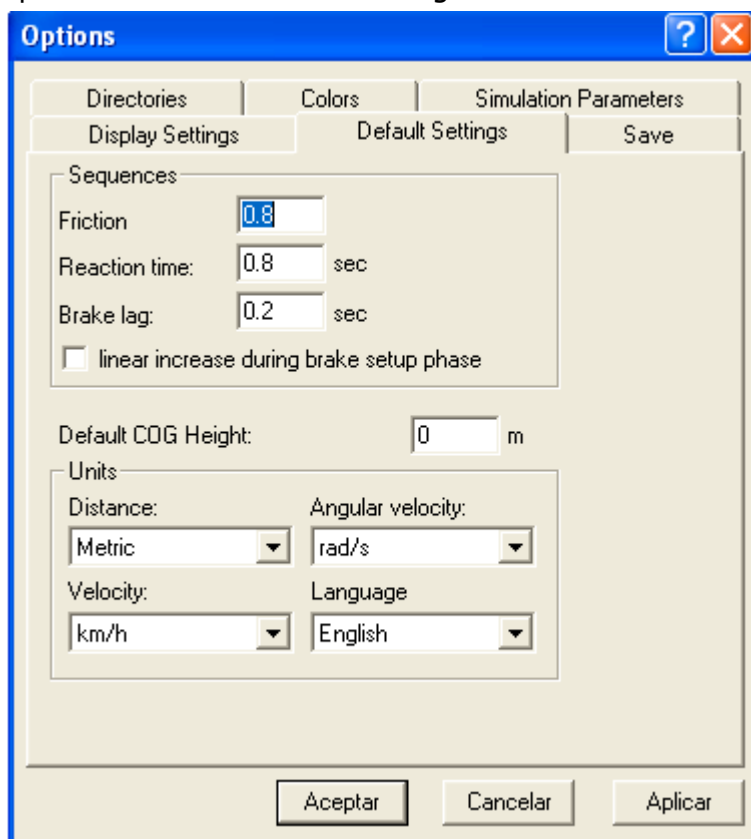
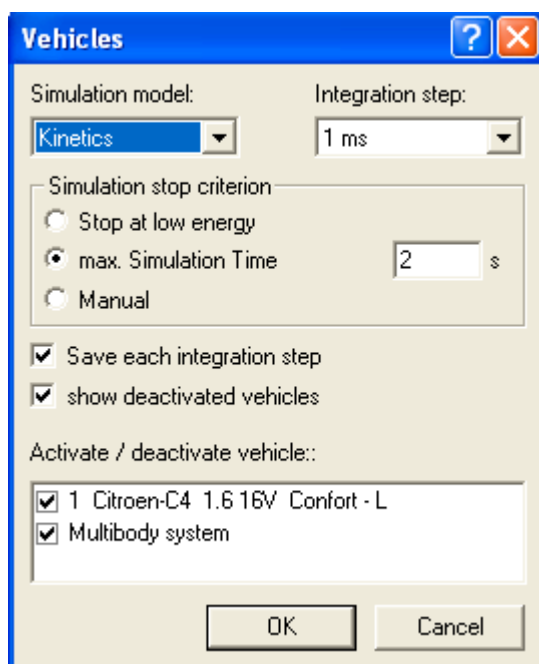


Figura 5.1 – Menú de opciones de PC-CRASH

- ♦ *Directorios.* Donde se especifican los diferentes directorios de trabajo del programa, ubicación de las bases de datos de vehículos, etc.
- ♦ *Colores.* Permite indicar distintos colores para cada uno de los 32 posibles vehículos que pueden participar en una misma simulación.
- ♦ *Guardar.* Se pueden fijar el tiempo de autoguardado, para evitar la pérdida de datos, o el número de pasos *hacia atrás* de la opción deshacer.
- ♦ *Opciones de visualización.* Contiene una serie de opciones sobre la visualización de las simulaciones, como son: trayectoria del centro de gravedad, marcas de neumáticos, visualización sólida de los vehículos, etc.

Estas opciones no influyen de modo significativo en las simulaciones, ya que únicamente modifican la forma en la que se ve la simulación. Existen otras opciones, dentro del mismo menú que sí influyen directamente sobre los resultados de la simulación. El primer bloque de opciones son las que definen los valores de algunos de los parámetros por defecto que se consideran durante las simulaciones, como son los referentes a los distintos valores en las secuencias, pre y post impacto; el valor de la altura del centro de gravedad de los vehículos, que además se utiliza para definir si las simulaciones son consideradas en 3D (si el valor es superior a 0); o las unidades consideradas, sistema métrico internacional o imperial. A excepción de éstas últimas, el resto, al tratarse de valores por defecto de algunos parámetros, implica que pueden modificarse posteriormente en sus respectivos menús según las preferencias del usuario. En el último bloque de opciones se indican algunos parámetros de simulación, referentes sobre todo a los casos en los dos vehículos colisionen, y por tanto sus valores en el caso de un atropello no influyen.

El otro menú de configuración de los parámetros de la simulación, es el de Vehículos ("Vehicles"), situado en la barra de simulación. Desde esta barra de simulación, junto con el menú de opciones incluido, es desde donde se controla realmente los parámetros propios de cada simulación.

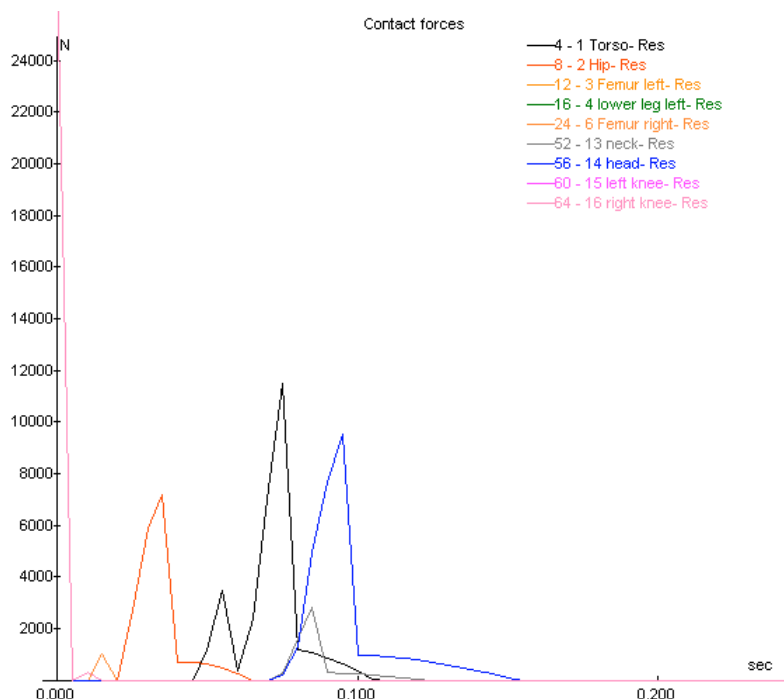
**Figura 5.2 – Menú de control de la simulación****Figura 5.3 – Barra de simulación**

En la Figura 5.2 se muestra el menú de configuración de los parámetros de simulación, incluyendo los valores que han sido tomados en todos los casos de atropello simulados. Es posible ver que el criterio de detención de la simulación está fijado en un tiempo máximo de 2 segundos. La decisión de considerar un tiempo de 2 segundos, se debe por un lado, a que los acontecimientos más significativos postimpacto se presentan dentro de este margen de tiempo, y por otro lado, que considerar un tiempo mayor de simulación supone un mayor tamaño de los archivos generados, y debido a la gran cantidad de estos, el almacenado y su uso se ve perjudicado.

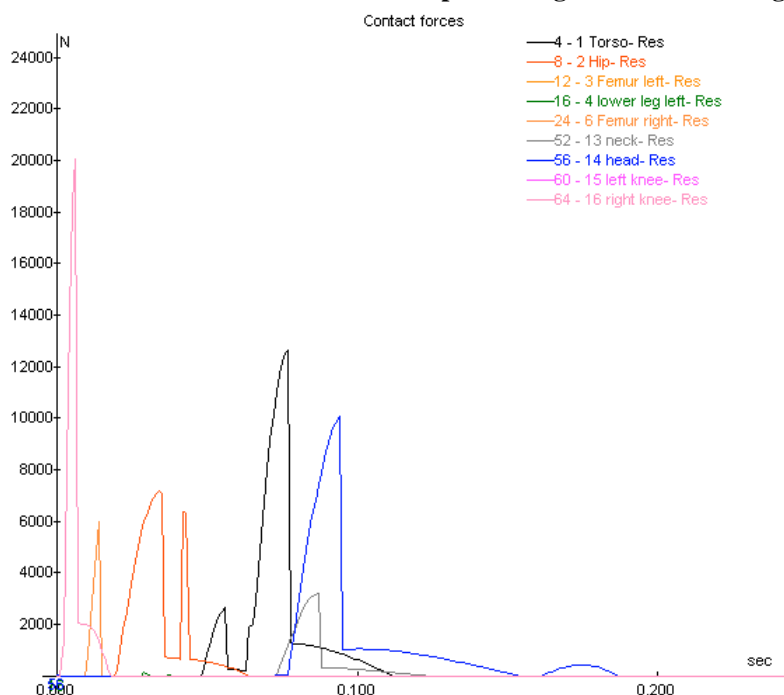
La siguiente opción a configurar es el modelo de simulación empleado. PC-CRASH resuelve las simulaciones mediante dos modelos, uno cinético y otro cinemático. En este último modelo, los movimientos de los elementos de la simulación, un vehículo por ejemplo, están definidos previamente por el usuario del programa mediante la creación de trayectorias que son seguidas por el vehículo. Mientras que en el modelo cinético, los movimientos y trayectorias de los vehículos son regidos por leyes físicas, únicamente proporcionando ciertos valores iniciales. Por este motivo, todas las simulaciones han sido calculadas empleando este modelo cinético.

El último de los parámetros influyentes en los resultados de la simulación es el Tiempo de integración ("Integration step"), que puede ser variado desde 5ms. hasta 0.01ms.. El programa por defecto realiza los cálculos para un tiempo de integración de 5ms, sin embargo después de realizar diversas pruebas con distintos tiempos de integración se ha considerado emplear el tiempo inmediatamente inferior de los disponibles, es decir, 1 ms..

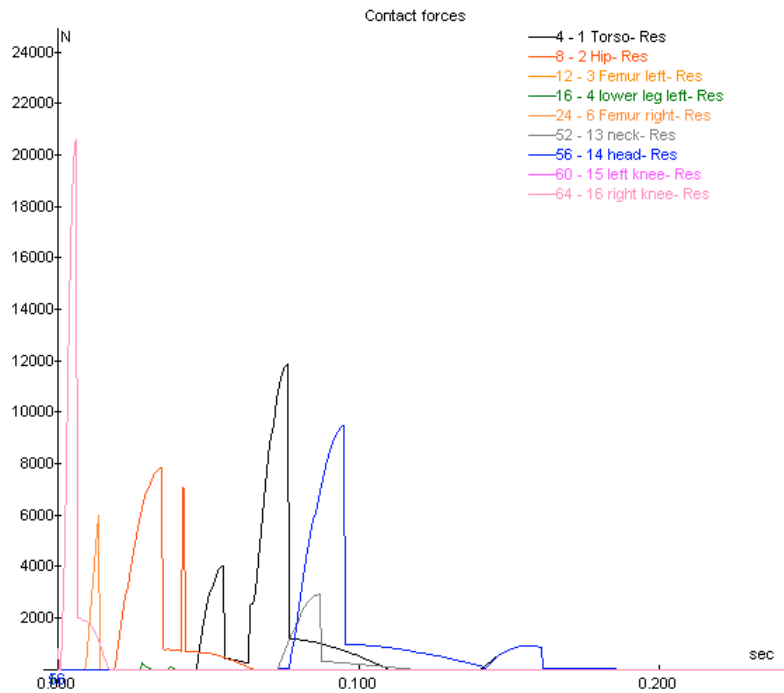
La principal diferencia que se aprecia cuando se realiza la simulación de un mismo sistema modificando el tiempo de integración, es que los valores y gráficos generados varían sensiblemente, a pesar de que en la visualización de los resultados en la ventana gráfica del programa no aparecen diferencias apreciables. A continuación de han incluido los resultados obtenidos de una misma simulación, variando el tiempo de integración, de forma que sea posible ver las diferencias y justificar el valor elegido finalmente para las simulaciones.



**Gráfico 5.1 – Resultados de la simulación con un tiempo de integración de 5 milisegundos**



**Gráfico 5.2 – Resultados de la simulación con un tiempo de integración de 1 milisegundo**



**Gráfico 5.3 – Resultados de la simulación con un tiempo de integración de 0.5 milisegundos**

Como se puede observar en el Gráfico 5.1, correspondiente con un atropello calculado con 5 ms., las gráficas de los segmentos del peatón considerados, están formadas por unos tramos rectos fácilmente apreciables, pero que a la vez, debido a que el tiempo entre los cálculos es demasiado grande, existe una importante pérdida de información entre cada tramo de la gráfica. De hecho, algunos acontecimientos que ocurren rápidamente no son recogidos en los resultados. El siguiente gráfico, corresponde con la simulación calculada con 1ms como tiempo de integración. En este caso, es posible apreciar una clara diferencia respecto al gráfico anterior, siendo más difícil poder diferenciar tramos rectos que unen los distintos puntos de cálculo. Al ser gráficas más suavizadas, por estar formada por una cantidad de puntos cinco veces superior, la información que se obtiene es más completa, ya que permite representar contactos, en este caso, cuya duración mínima es de 1ms. Por último, en la gráfica correspondiente a 0.5 ms se puede apreciar con más detalle todos los contactos que ocurren en los primeros instantes tras la colisión, observando las curvas más suavizadas de las tres gráficas presentadas.

Tras comparar los resultados obtenidos con estos tres tiempos de integración se ha tomado la decisión de emplear el tiempo intermedio de 1ms., por dos motivos. El primero de ellos, es que a pesar de que las gráficas del tiempo 0.5ms ofrecen una información más completa y correcta, existe una gran similitud entre ambas gráficas, tanto en los valores máximos como los tiempos en los que se producen. Esto significa que con un tiempo de 1ms es suficiente para detectar los principales contactos que se producen entre el vehículo y el peatón, o los de éste con el suelo, y por tanto puede ser un valor aceptable. El segundo motivo, y quizás más determinante, es de nuevo el tamaño del archivo generado, que hace que los casos resueltos con 0.5ms. requieran

el doble de memoria que los resueltos con 1ms. El número de simulaciones realizadas junto con las simulaciones de prueba, superan las 600, lo que complica y alarga toda tarea de manipulación, almacenaje e incluso la propia carga de los archivos. Por todo esto, se ha considerado el tiempo de integración de 1ms. como el más apropiado para realizar las simulaciones, manteniendo un equilibrio entre unos resultados aceptables y unos requerimientos de memoria contenidos.

Existen otros parámetros que no afectan directamente a las simulaciones ni a sus resultados, sino que permiten definir entre otras cosas la forma en la que éstas se visualizan, como es el empleo de una rejilla superpuesta sobre el fondo de la pantalla principal. En todos los casos llevados a cabo se ha empleado una rejilla con una separación de 1 metro, con la cual poder evaluar de forma rápida la variación en la posición del peatón tras el atropello, tanto en el eje *x* como en el eje *y*. Además de esto, y aunque el programa permite incluir imágenes u otro tipo de elementos gráficos como señales viales, no se han considerado para reducir al máximo el tamaño de los archivos generados, así como el tiempo de cálculo de las simulaciones.

### 5.2.2 Elección y modelización de los vehículos

Uno de los objetivos marcados para este proyecto, en su parte dedicada a la simulación, es el realizar diferentes tipos de atropello con configuraciones variables tanto de velocidad, posición del peatón, pero sobre todo, del vehículo implicado. La idea de emplear vehículos correspondientes a categorías distintas, como por ejemplo un turismo medio o un vehículo industrial, resulta interesante para poder evaluar la influencia que tiene el vehículo tanto en la cinemática del peatón tras el impacto, como en las zonas del cuerpo que se ven afectadas en el atropello, así como el daño producido en el sujeto.

Antes de elegir algún vehículo, dentro de la extensa base de datos disponible en PC-CRASH ha sido necesario un proceso de selección de estos vehículos, ya que de no ser así, sería difícil poder escoger, incluso de forma arbitraria, alguno entre los miles de vehículos disponibles. Por todo esto, en primer lugar se ha tomado la decisión de emplear un vehículo de cada una de las siguientes categorías:

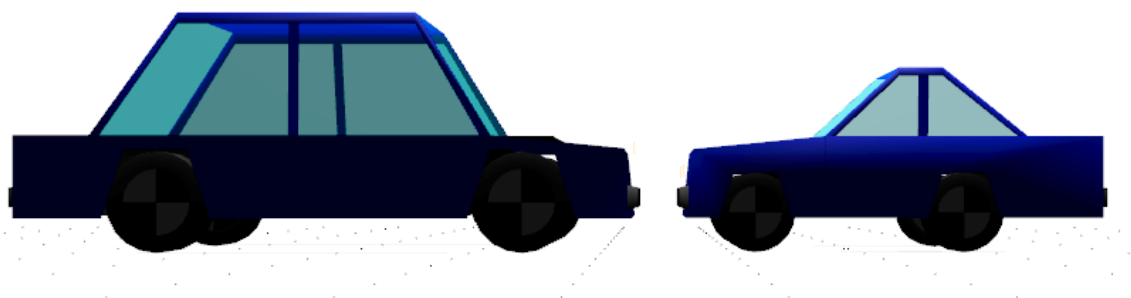
- ♦ Turismo medio
- ♦ Monovolumen
- ♦ Todoterreno o SUV
- ♦ Deportivo
- ♦ Furgón comercial
- ♦ Camión

Se ha considerado que al utilizar estos seis tipos distintos de vehículos se están teniendo en cuenta características de los mismos muy dispares, como la geometría del frontal, y por tanto es posible obtener una información más completa a partir de la

cual poder extraer conclusiones de carácter general, ya que se abarca un mayor abanico de casos posibles.

Para elegir el vehículo de cada categoría se ha considerado alguno de los vehículos más vendidos en España, según la lista de ventas obtenida de AniaCam en el año 2007 [71], como primer criterio de selección. No se han tomado los datos de 2008 ya que en el momento de seleccionar los vehículos y generar las simulaciones, los datos globales de 2008 aún no estaban disponibles.

Antes de continuar avanzando con este apartado, es necesario incluir una importante aclaración en este punto, que influye en gran medida en los modelos empleados y en las simulaciones realizadas. Como se ha comentado en el Capítulo 4, a la hora de considerar el modelo de los vehículos es imprescindible tener en cuenta el alcance de la simulación, para de esta forma realizar la modelización de la forma más eficiente posible. En PC-CRASH, los vehículos incluidos en la base de datos están definidos en forma de sólidos planos, con una geometría muy simplificada. Y a pesar de que los datos de los vehículos abarcan prácticamente todas las especificaciones de los mismos, la geometría "lateral" del vehículo, incluido el frontal, no está definida de forma específica para cada uno de ellos, sino que presentan geometrías básicas por defecto. De este modo es posible encontrar que vehículos tan dispares como un todoterreno o un utilitario presentan frontales de alturas y formas similares. En la Figura 5.4, puede verse un ejemplo de esto, donde un todoterreno como el Toyota LandCruiser y el utilitario Fiat Cinquecento son modelizados con la misma geometría frontal.

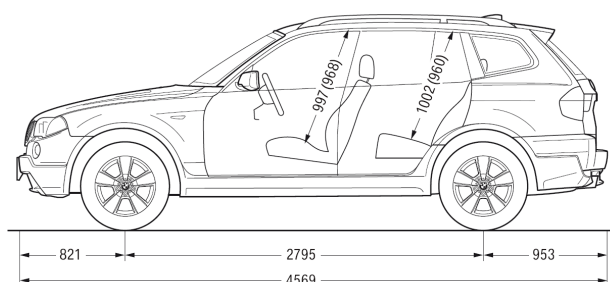


**Figura 5.4 – Ejemplo de la geometría por defecto de los vehículos. A la izquierda, Toyota Land Cruiser; a la derecha, Fiat Cinquecento.**

Este inconveniente puede solventarse de dos modos diferentes. La primera solución consiste en aprovechar la posibilidad que presenta el programa de emplear carrocerías o formas exteriores de los vehículos realizadas en 3D, a partir de la geometría real y cuyo nivel de detalle geométrico es muy similar al vehículo real. Estas formas 3D son reconocidas por el programa y si se activa una opción en uno de los menús, posibilita que los contactos entre esta forma 3D y el peatón sean reconocidos. Aunque parece

una buena solución presenta dos grandes inconvenientes. El primero de ellos es que en el programa el número de formas 3D disponibles se limita a unas pocas decenas, correspondientes a vehículos antiguos, y por tanto esta posibilidad no cubre el criterio considerado de selección de los vehículos. Y por otra parte, el uso de este tipo de geometría en tres dimensiones puede provocar inestabilidad en el programa, y otros fallos de simulación debido a las posibles singularidades puntuales en la geometría [60].

La otra solución posible, y la que ha sido adoptada finalmente para realizar el modelado de los vehículos usados en la simulación, es modificar la geometría de los vehículos seleccionados, para que de esta forma se logre que cada tipo de vehículo presente una silueta característica. Esta decisión implica que tanto los modelos de vehículo como el modelo de peatón mantengan un nivel similar de simplificaciones, lo supone un equilibrio aceptable con los resultados requeridos, y a la vez supone un método de modelización más conveniente, al mantener una mayor armonía entre ambos sistemas.



**Figura 5.5 – Vista lateral acotada del SUV (Sport Utility Vehicle) empleado en las simulaciones**

Para realizar la modificación geométrica de cada modelo se ha partido de un plano de la vista lateral acotada del vehículo, en alta resolución, aspecto que ha condicionado en cierta medida el vehículo seleccionado de cada categoría. A partir del plano acotado, y empleando la técnica de toma de mediciones a partir de una fotografía, descrita en (*Xavier, 1997*), se han obtenido las dimensiones aproximadas del frontal real. En este proceso se ha utilizado un programa de CAD (AutoCAD), debido a la necesidad de trazar distintas líneas y puntos de referencia, así como la obtención de dimensiones entre distintos puntos, que son introducidas posteriormente en el menú de configuración del vehículo, consiguiendo de esta forma la pretendida geometría lateral aproximada. Este proceso puede verse en las siguientes figuras.



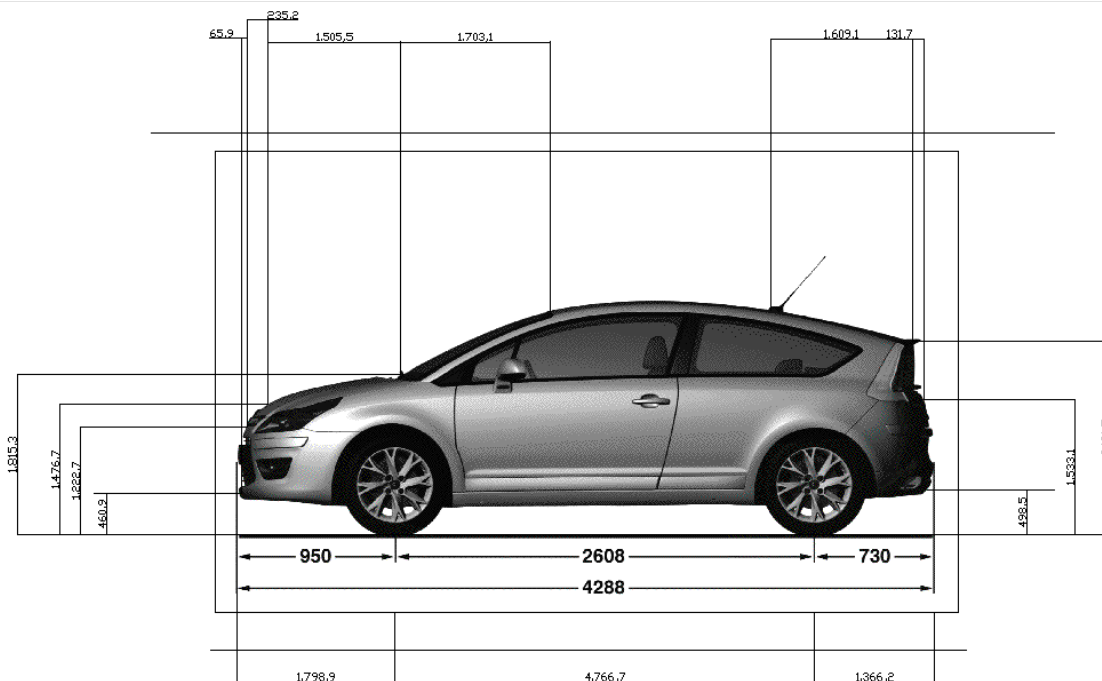
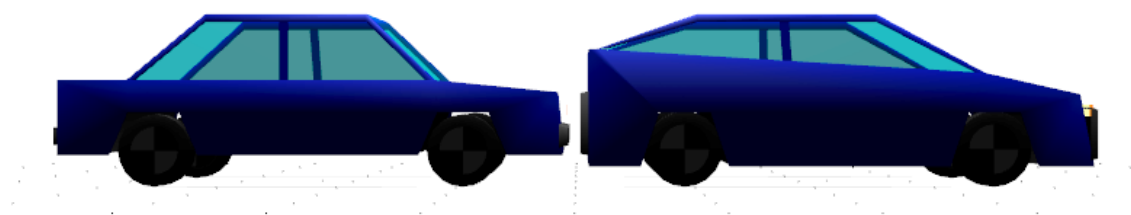


Figura 5.6 – Proceso de toma de medidas sobre la vista lateral de un vehículo, realizado con AutoCAD

Rear Brake Force		Trailer		Vehicle Shape	
1 Citroen-C4				Sedan	
a: 0.03 m	f: 0.07 m	1: 0.24 m	6: 0.81 m		
b: 0.12 m	g: 0.85 m	2: 0.65 m	7: 1.16 m		
c: 0.8 m		3: 0.78 m	8: 0.17 m		
d: 0.9 m		4: 0.96 m			
e: 0.07 m		5: 0.26 m			

Figura 5.7 – Introducción manual de las dimensiones del vehículo en PC-CRASH



**Figura 5.8 – Comparativa entre la geometría por defecto (a la izquierda) y la geometría modificada (a la derecha) de uno de los vehículos utilizados en las simulaciones**

Tras la consideración de estos aspectos geométricos, junto con la lista de ventas de vehículos según las distintas categorías, más la disponibilidad de modelos en la base de datos de PC-CRASH, la selección de vehículos que definitivamente han sido escogidos para emplearse en las simulaciones son los siguientes:

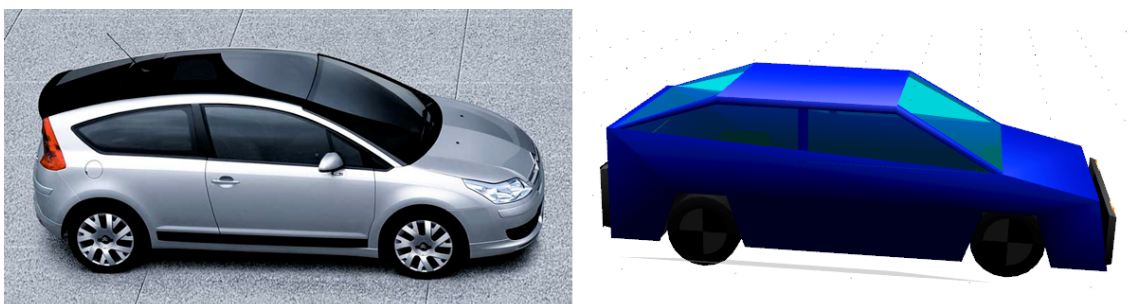
***Citroën C4 (turismo medio)*** [72]

Masa: 1310 kg.

Longitud máxima: 4.26 m.

Anchura máxima: 1.77 m.

Altura máxima: 1.46 m.



**Figura 5.9 – Citroën C4 real y el modelo considerado en las simulaciones**

***Renault Grand Espace (monovolumen)*** [73]

Masa: 1665 kg.

Longitud máxima: 4.86 m.

Anchura máxima: 1.89 m.

Altura máxima: 1.74 m.

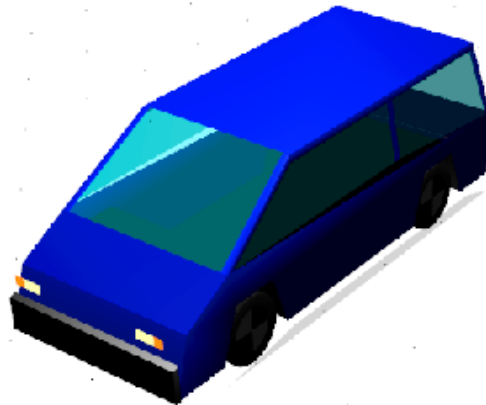


Figura 5.10 – Renault Grand Espace real y el modelo considerado en las simulaciones

***BMW X3 (todoterreno o SUV) [74]***

Masa: 1880 kg.

Longitud máxima: 4.57 m.

Anchura máxima: 1.85 m.

Altura máxima: 1.67 m.

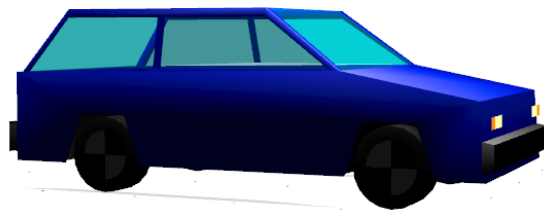


Figura 5.11 – Bmw X3 real y el modelo considerado en las simulaciones

***Mercedes SLR (deportivo) [75]***

Masa: 1825 kg.

Longitud máxima: 4.65 m.

Anchura máxima: 1.90 m.

Altura máxima: 1.28 m.

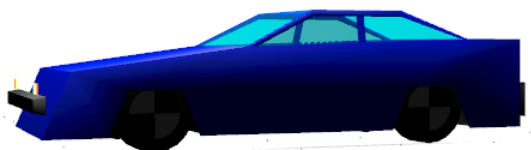


Figura 5.12 – Mercedes SLR real y el modelo considerado en las simulaciones

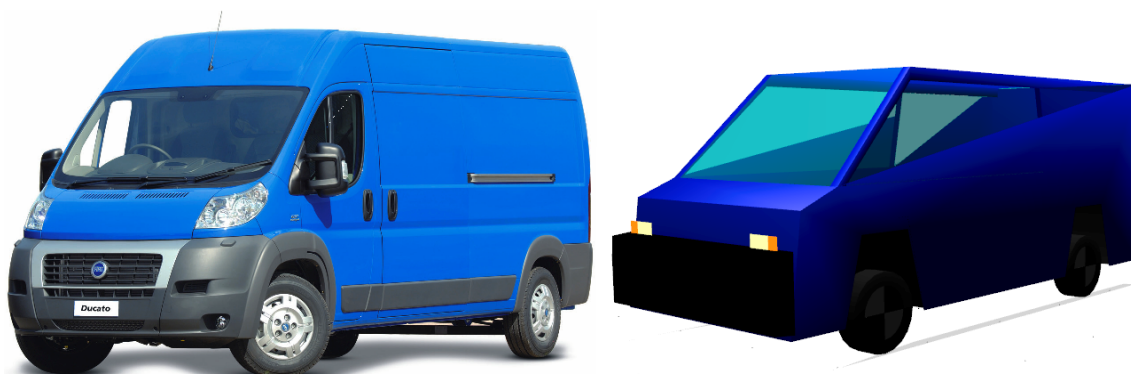
***Fiat Ducato (furgón comercial)*** [76]

Masa: 1860kg.

Longitud máxima: 4.96 m.

Anchura máxima: 2.05 m.

Altura máxima: 2.25 m.



**Figura 5.13 – Fiat Ducato real y el modelo considerado en las simulaciones**

***Iveco EuroCargo (camión)*** [77]

Masa: 5030 kg.

Longitud máxima: 5.4 m.

Anchura máxima: 2.33 m.

Altura máxima: 2.51 m.



**Figura 5.14 – Iveco EuroCargo real y el modelo considerado en las simulaciones**

Durante el proceso de modificación de los vehículos utilizados se han verificado que las características publicadas por los fabricantes coinciden con los datos que constan en la base de datos, procediendo a la corrección de aquellos que han sufrido alguna variación como consecuencia de la evolución del vehículo en recientes versiones. El resto de valores se han mantenido según aparecen en el programa por defecto, como son las características de las suspensiones o distribución de la frenada. Con respecto a este último aspecto, es necesario incluir un comentario sobre una decisión tomada a la hora de incluir cualquiera de los vehículos. A pesar de que los datos de cada vehículo incluido en la base de datos son muy completos, en la mayoría de las ocasiones, el valor de la altura del centro de gravedad es algo que se desconoce, y puesto que para realizar simulaciones en tres dimensiones es necesario definir un valor de este parámetro, se ha considerado un mismo valor para todos los vehículos de 0.55 m., usado en PC-CRASH en alguna de las simulaciones disponibles como ejemplos de muestra y valor mencionado en el manual. El valor de este parámetro influye en el comportamiento dinámico del vehículo, a la vez que en el reparto de pesos sobre los ejes durante una frenada. Con todo esto, y teniendo en cuenta que en las simulaciones, el comportamiento del vehículo tiene una importancia mínima, se ha considerado este valor de la altura del centro de gravedad como válido.

### 5.2.3 Configuración del modelo de peatón empleado

Como ya se indicaba en el Capítulo anterior, el modelo de peatón empleado en las simulaciones es el sistema multicuerpo disponible en la base de datos de PC-CRASH. El peatón representa un individuo de 1.83m. y 80 kg., que corresponde aproximadamente con un sujeto masculino correspondiente a un percentil del 50%.

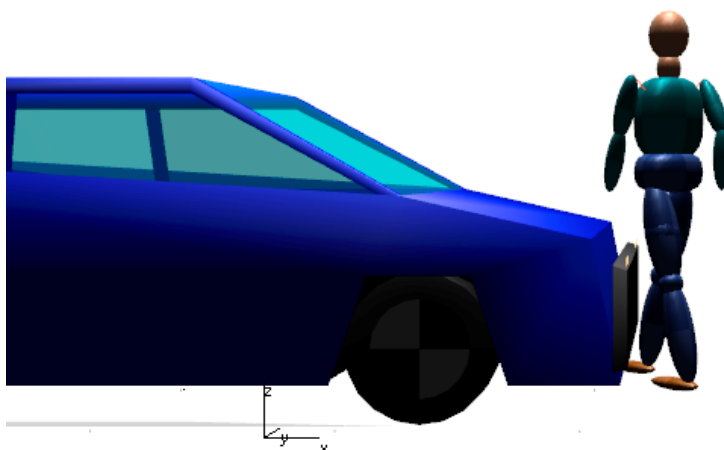
A pesar de disponer de varias opciones de configuración, sobre todo relacionadas con las articulaciones, se ha considerado emplear el modelo de peatón básico, con su configuración por defecto. Existen varias razones que respaldan esta decisión:

- ◆ Para poder introducir elementos o valores en ciertos parámetros que modifican el comportamiento del cuerpo del peatón, es necesario contar con valores de referencia para conseguir una respuesta del sistema multicuerpo similar. Sin embargo, en este caso, no se disponen de estos datos.
- ◆ La introducción de un mayor número de variables, que pueden ser modificadas de manera independiente, dificulta en exceso el proceso de simulación, haciendo que sean necesarias un número indeterminable de simulaciones. Además, cuanto más complicados son los modelos y mayor es el número de variables empleadas, la obtención de resultados y conclusiones útiles puede llegar a ser objetivo inviable en algunos casos.
- ◆ Debido a las fuerzas, de corta duración o de impacto, a las que se ve sometido un cuerpo humano durante un atropello, éste en general no tiene tiempo

suficiente para reaccionar, de manera que se comporta como si se tratase de un cuerpo inerte. La configuración por defecto del modelo de peatón permite este tipo de comportamiento, ya que no existen elementos que reaccionen antes acciones externas como son los amortiguadores o los resortes, y los movimientos de los segmentos están regidos únicamente por las fuerzas externas aplicadas, el contacto y rozamiento entre los cuerpos, y la acción de la gravedad.

- ♦ El objetivo que se pretende con este Proyecto y con las simulaciones realizadas, requieren un modelo de peatón simplificado, pero realista, que permita ofrecer información general de lo que ocurre durante un atropello, y por tanto, no es necesario un modelo de peatón más complejo.

Durante las simulaciones, el peatón ha sido ubicado en diferentes posiciones respecto de los frontales de los vehículos, manteniendo en general la postura erguida por defecto. Únicamente en algunos casos se ha usado una configuración distinta para conseguir la postura de un peatón caminando o corriendo. Debido a que el modelo no dispone de elementos que le permitan mantener una postura fija determinada, y para evitar el efecto de la gravedad, el peatón se ha posicionado a la distancia mínima posible del vehículo en el momento de inicio de la simulación. De esta forma, desde que comienza la simulación hasta que se produce la colisión únicamente transcurren escasas milésimas de segundo, en el que el cuerpo del peatón cae hacia el suelo, pero cuyo movimiento puede ser despreciado y considerar la postura del peatón en el momento del atropello como la de inicio de la simulación.



**Figura 5.15 – Ejemplo de la situación inicial del peatón en las simulaciones**



### 5.3 DETERMINACIÓN DE LA TIPOLOGÍA DE ATROPELLO SEGÚN EL TIPO DE VEHÍCULO Y VELOCIDAD

En el Capítulo 2.5 de este Proyecto, se describen las cinco diferentes tipologías que tradicionalmente son consideradas cuando ocurre el atropello de un peatón. Para facilitar el seguimiento de este apartado se incluyen, a continuación, cinco figuras donde se puede ver las secuencias de movimientos que definen las distintas tipologías, así como el nombre de cada una de ellas.



Figura 5.16 – Trayectoria de envoltimiento (wrap trajectory)



Figura 5.17 – Proyección hacia delante (forward projection)



Figura 5.18 – Volteo sobre la aleta (fender vault)

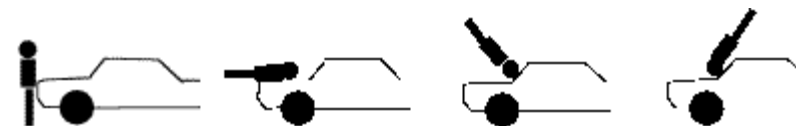


Figura 5.19 – Volteo sobre el techo (roof vault)

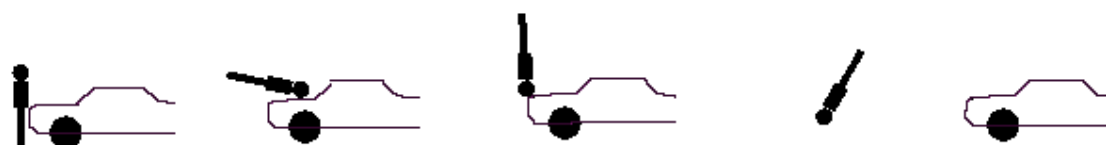


Figura 5.20 – Salto mortal (somersault)

La primera parte de las simulaciones tiene como objetivo determinar las posibles tipologías de atropello que pueden ocurrir dependiendo del tipo de vehículo y la velocidad de éste en el momento de la colisión. Además de esto, se pretende comprobar si los valores teóricos estimados son válidos para cualquier vehículo, o si por el contrario, la categoría del vehículo tiene influencia, o no, en los resultados.

Los principales factores que pueden influir en que un atropello sea de una tipología u otra, son los siguientes:

- ◆ Estatura del peatón.
- ◆ Geometría del frontal del vehículo.
- ◆ Velocidad del vehículo.
- ◆ Masa del vehículo.
- ◆ Posición relativa entre peatón y vehículo.

En la serie de simulaciones propuestas se ha eliminado una de las variables, la estatura del peatón, ya que se ha empleado el mismo peatón, modelizado con el sistema multicuerpo. De esta forma, resulta más sencillo poder comparar los resultados de los ensayos y obtener conclusiones más certeras. Al ir variando el resto de factores uno a uno, se consiguen un número suficiente de ensayos con los cuales conocer de forma aproximada los factores que deben concurrir para que, en caso de atropello, la tipología que se dé sea de un tipo u otro.

### **5.3.1 Preparación de las simulaciones**

Para cada uno de los seis vehículos se han considerado diferentes configuraciones del sistema vehículo-peatón, a partir de las cuales se ha podido determinar el tipo de atropello en cada caso, y se ha observado si alguna tipología no es posible.

En todas las simulaciones realizadas para este fin se ha pretendido reproducir un accidente típico en el que el vehículo realiza una maniobra de frenada para intentar evitarlo, la cual comienza instantes antes del impacto, aproximadamente en la posición de ejecución de la decisión o PED, y finaliza con la detención total del vehículo una vez producido la colisión. El programa de simulación permite incluir diferentes maniobras realizadas por el vehículo, previas al punto de inicio de la simulación, y también posteriores a éste. En las simulaciones se han incluido las siguientes maniobras, que constituyen la secuencia de frenada realizada por cada vehículo:



- ♦ *Tiempo de reacción.* El tiempo de reacción transcurrido desde que el hipotético conductor del vehículo identifica el peligro como inminente y decide realizar la acción de actuar sobre el pedal de freno se ha fijado en 0.5 segundos. Este tiempo no es determinante en los resultados de la simulación, y por tanto, no se ha seleccionado un tiempo mayor, quizás más realista, ya que de este modo el archivo de datos generado mantiene un tamaño lo más reducido posible.
- ♦ *Frenada pre-impacto.* La frenada realizada tras el tiempo de reacción se ha configurado con un tiempo de retardo del sistema de frenado de 0.2 segundos, cuyo valor es el considerado por defecto por el programa. La frenada se realiza con el pedal del freno presionado al 100% de su recorrido, lo que determina tanto la deceleración media conseguida, como el reparto de frenada en las ruedas delanteras o traseras, cuyos valores dependen de los ajustes de cada vehículo, los cuales no han sido modificados, considerando los valores por defecto. También es posible determinar el tiempo o la distancia durante la cual se efectúa la acción, en este caso, de frenada. En los ensayos llevados a cabo se ha considerado una distancia de 10 metros, como un valor aproximado como distancia de frenado previa a un atropello. La configuración de las maniobras previas al punto de inicio de la simulación no tienen efecto sobre los resultados, pero es necesario considerar una serie de valores para definir la secuencia.
- ♦ *Frenada post-impacto.* La frenada posterior al impacto se ha considerado continua desde antes de la colisión, y por tanto el pedal de freno se mantiene presionado al 100%, hasta que el vehículo se detiene por completo, o como en este caso, durante 100 metros, manteniendo el valor por defecto y considerando suficiente esta distancia para la detención del vehículo.

Toda la secuencia de frenada se configura a través de una serie de menús, como los que aparecen en la siguiente Figura 5.21, incluida a modo de ejemplo.

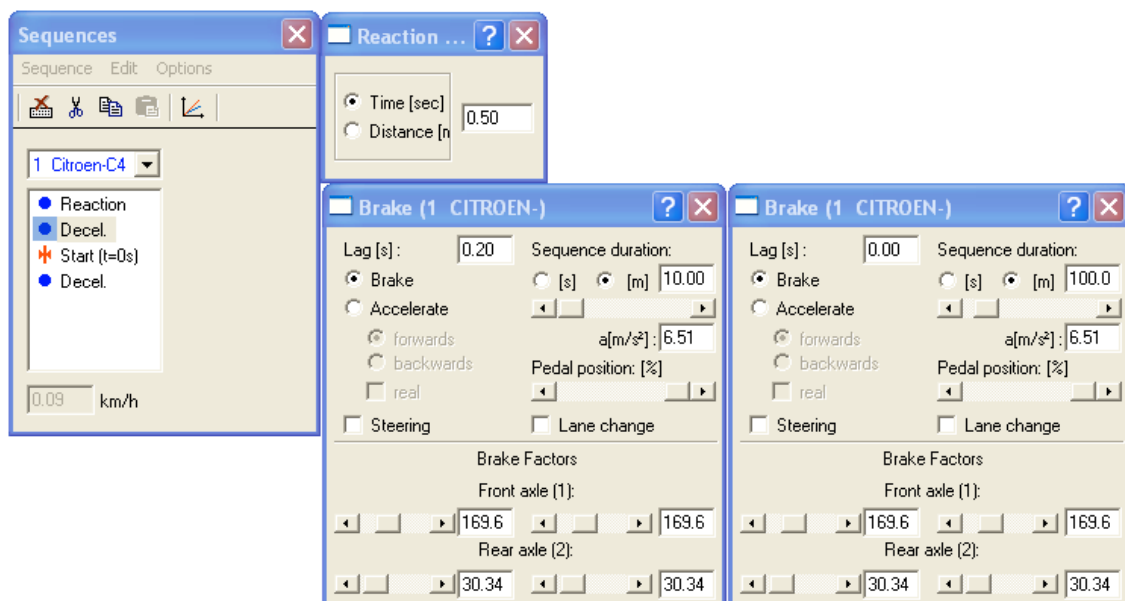


Figura 5.21 – Configuración de la secuencia de frenada utilizada en las simulaciones

La velocidad del vehículo en el momento de la colisión con el peatón es una de las principales variables que se han tenido en cuenta para desarrollar las distintas simulaciones en este apartado de la parte experimental. Para poder conocer aproximadamente la influencia que tiene la velocidad en caso de atropello en la tipología del mismo, se han considerado un número limitado de valores, comprendidos entre una velocidad mínima de 10 km/h y máxima de 80 km/h. El incremento en la velocidad de una simulación a otra ha sido de 10 km/h, por lo que para cada configuración de atropello se han conseguido 8 casos diferentes.

Otra de las posibles variables que pueden influir en el resultado de la simulación y en la tipología del atropello dada en cada caso, es la posición y orientación del peatón respecto del frontal del vehículo. Por esta razón, se han definido una serie de ensayos en los que se simulan distintas posiciones del peatón. En todos los casos, el peatón empleado es el modelo multicuerpo ya descrito, con todos los parámetros sin modificar, en posición erguida y con todos sus segmentos corporales en posición de reposo. En la Tabla 5.1 aparece un cuadro resumen con las configuraciones seleccionadas de las distintas posibilidades de orientación y posición del peatón que se han simulado. En los casos en los que el peatón se encuentra en posición lateral, es decir, con su plano medio sagital perpendicular al plano medio longitudinal del vehículo, se han considerado un ensayo adicional, introduciendo una velocidad del peatón de 5 km/h, para simular los casos en los que éste es atropellado mientras camina.

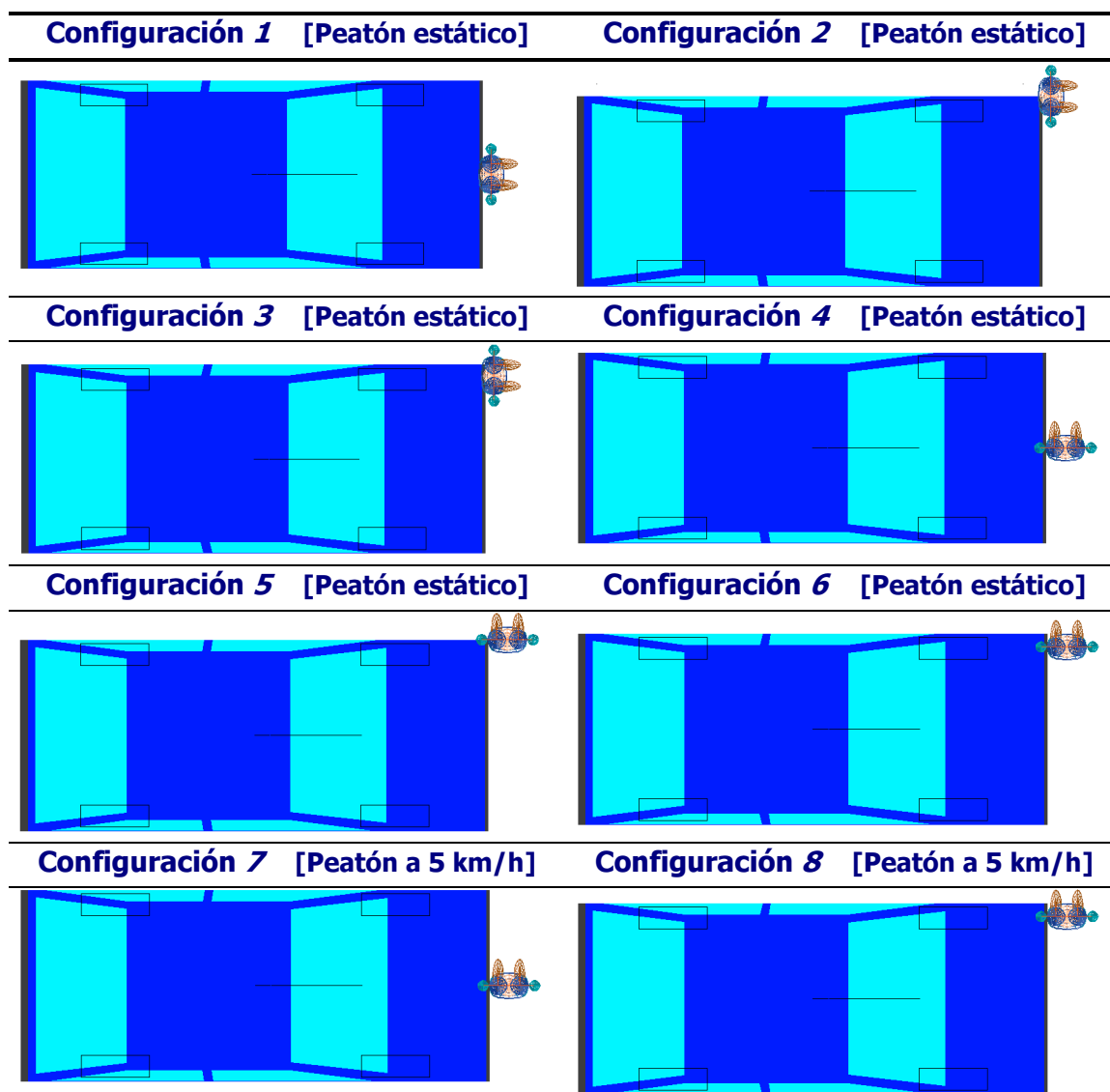


Tabla 5.1 – Configuraciones de vehículo-peatón empleadas para las simulaciones de evaluación de la tipología de atropello

Como resultado de la variación de las diferentes opciones de configuración de la simulación, se han conseguido un número significativo de casos que se resumen en el siguiente cuadro.

Vehículo simulado	Configuraciones de atropello	Velocidad del vehículo
Turismo medio: Citroën C4	1 - 8	10 – 80 km/h
Monovolumen: Renault Grand Espace	1 - 8	10 – 80 km/h
SUV: BMW X3	1 - 8	10 – 80 km/h
Deportivo: Mercedes SLR	1 - 8	10 – 80 km/h
Furgón comercial: Fiat Ducato	1 - 8	10 – 80 km/h
Camión: Iveco EuroCargo	1 - 8	10 – 80 km/h

Tabla 5.2 – Resumen de las simulaciones llevadas a cabo para determinar la tipología de atropello

### 5.3.2 Resultados

En este apartado del Proyecto se pretende presentar de una forma ordenada los resultados de las simulaciones, haciendo mayor hincapié en aquellos aspectos más destacados.

Los resultados están presentados en forma de tablas, gráficos e imágenes, para cada uno de los seis vehículos considerados en las simulaciones. En lugar de incluir las tablas de todas las configuraciones de atropello simuladas, únicamente se muestran tres de las ocho configuraciones, por considerarse representativas de las diferentes configuraciones, ya que en éstas el peatón es atropellado en posición frontal, lateral y lateral en movimiento. En concreto, las configuraciones elegidas a modo de muestra, son la Configuración 2, Configuración 4 y Configuración 7. En cada una de las tablas correspondiente a estas simulaciones se indica si es posible observar las cinco posibles tipologías de atropello consideradas, incluyendo la velocidad mínima que es necesaria para que pueda ser reconocida cada una de las tipologías. Además de estos datos, se ha tenido en cuenta la cinemática del peatón durante el atropello en términos de distancias, y por esto se ha considerado en todos casos, los movimientos que sufre el cuerpo del peatón cuando es atropellado a 50 km/h. De esta forma es posible comparar los resultados entre las diferentes configuraciones de atropello simuladas, así como entre los diferentes vehículos ensayados. Para ello se recogen en cada tabla las distancias recorridas por el peatón tras la colisión con el vehículo, en los tres ejes (x, y, z), tomando para ello como referencia el multicuerpo que representa la cadera. La razón de esta elección se basa en que la altura aproximada del centro de masas, calculado, del modelo de peatón (1.09 m.), se encuentra muy próximo al centro de masas de la cadera.

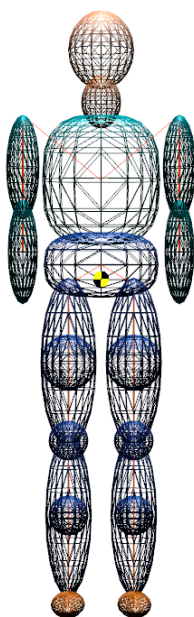


Figura 5.22 – Localización del centro de masas del modelo de peatón

A pesar de ser presentadas únicamente las tablas de tres configuraciones, para el análisis y conclusiones de los resultados se han tenido en cuenta las ocho configuraciones simuladas para los seis vehículos considerados. El resto de tablas han sido incluidas en uno de los Anexos al final de este documento. Además de los resultados mostrados en el Anexo, esta memoria de Proyecto Fin de Carrera va acompañada de varios discos donde se encuentran recopilados y ordenados los archivos generados durante las simulaciones.

### 5.3.2.1 Tipologías de Atropello para un Turismo medio

#### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 2

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	30 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	-
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.8 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.28 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	3.8 m
Distancia recorrida en dirección transversal	2.4 m

Tabla 5.3 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 2 para el turismo medio

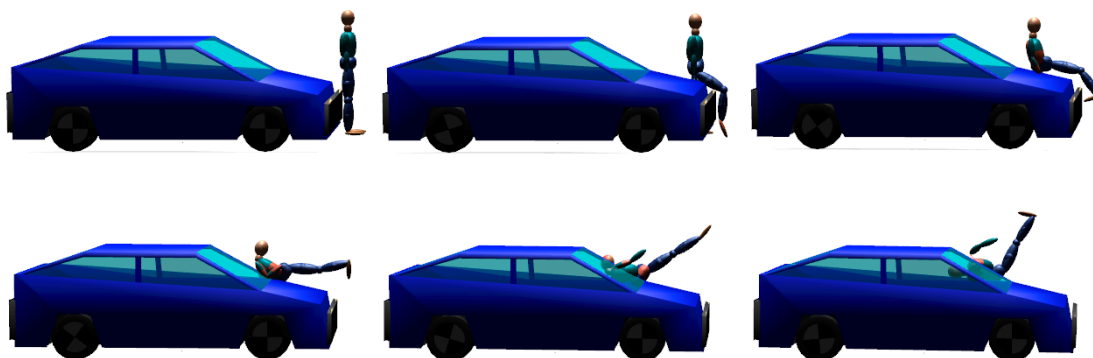


Figura 5.23 – Secuencia de atropello en la Configuración 2 a 50 km/h, para el turismo medio. El tiempo representado es de 165 ms

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 4

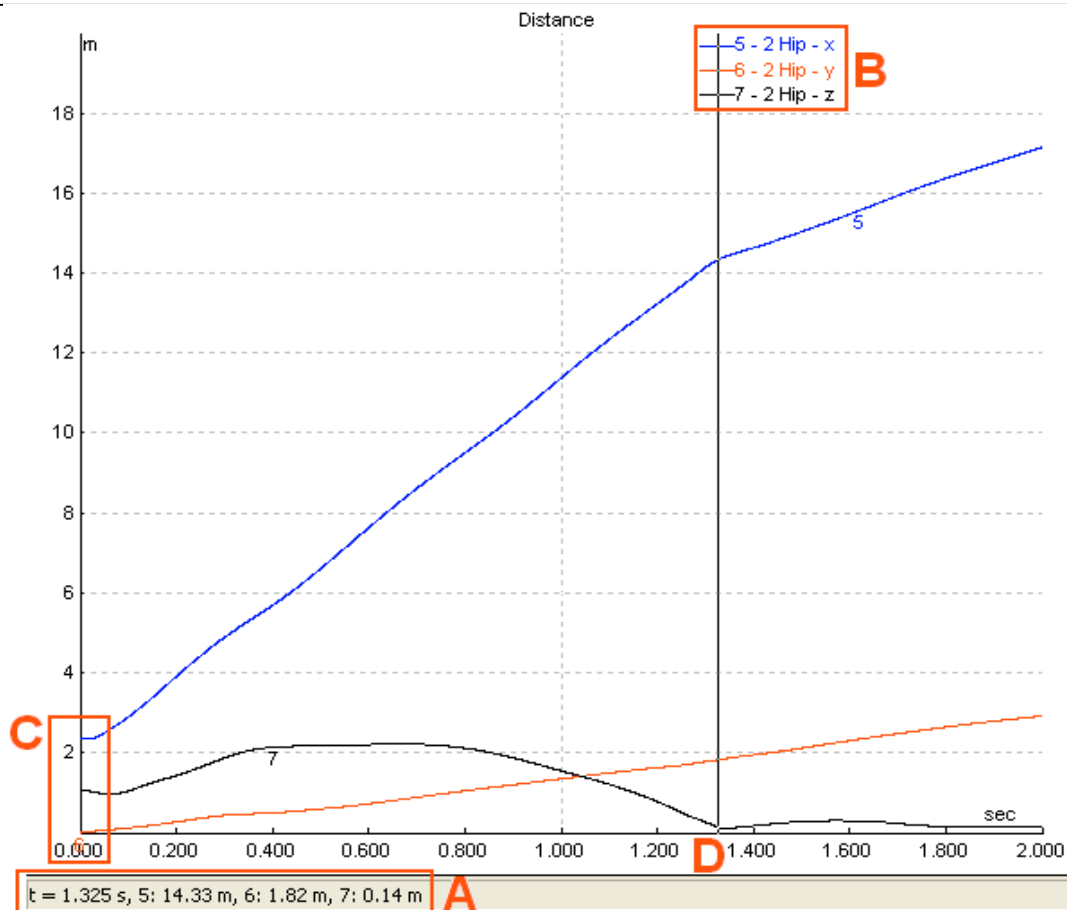
Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	30 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.37 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	2.27 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	12.9 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m

Tabla 5.4 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 4 para el turismo medio

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 7

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	30 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	40 km/h
Salto mortal (somersault)	40 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.33 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	2.22 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	12.36 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.85 m

Tabla 5.5 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 7 para el turismo medio



**Gráfico 5.4 – Ejemplo de la recopilación manual de datos a partir de los resultados gráficos ofrecidos por PC-CRASH**

El Gráfico 5.4 muestra un ejemplo de la visualización de los resultados de una simulación cualquiera proporcionados por el programa PC-CRASH. Aunque la magnitud representada es la distancia, la presentación de los resultados y la toma de datos es similar para el resto de magnitudes. Como puede apreciarse, la salida de resultados es gráfica, aunque en la zona señalada con la letra A, es posible ver los valores numéricos para cada magnitud, en un determinado instante de tiempo. En este caso el instante de tiempo está marcado por la letra D, que corresponde con el instante aproximado en el que el cuerpo del peatón choca contra el suelo. En la leyenda, marcada con la letra B, aparecen los segmentos del cuerpo seleccionados, así como los ejes en los que se representa la magnitud física elegida, en este caso, la distancia. En el ejemplo aparece el resultado para la cadera, ya que su centro de gravedad está muy próximo al c.d.g. del cuerpo completo, y puede servir como una buena referencia para mostrar los resultados globales del cuerpo. Como puede verse en la zona marcada con la C, al inicio de la simulación la posición del c.d.g. del peatón (o de la cadera del peatón) sitúa al peatón en reposo, erguido y en el centro del frontal del vehículo. Así permanece durante unas milésimas de segundo, pudiendo observar una ligera pérdida de altura debido a la atracción gravitatoria, hasta que se produce la colisión con el vehículo, momento en el que puede apreciarse un aumento de las variables seleccionadas. La línea negra muestra la altura del peatón tras el impacto, y como éste

describe una trayectoria aproximadamente parabólica hasta que choca contra el suelo en el punto D, sufriendo después un ligero rebote contra el mismo. La línea de color azul muestra un aumento de la distancia recorrida longitudinalmente por el peatón, y como tras el choque contra el suelo éste se sigue desplazando, aunque lo hace con una velocidad menor, o lo que es lo mismo, la pendiente de la curva del desplazamiento disminuye. La línea roja representa el desplazamiento del peatón de forma transversal al vehículo, pudiendo apreciarse que en el momento del choque contra el suelo ha recorrido una distancia de 1.82 metros desde su posición inicial, lo que significa que se aleja 1 metro del lateral del vehículo, aproximadamente.

### 5.3.2.2 Tipologías de Atropello para un Monovolumen

#### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 2

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	30 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.9 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	6.6 m
Distancia recorrida en dirección transversal	2.75 m

Tabla 5.6 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 2 para el monovolumen

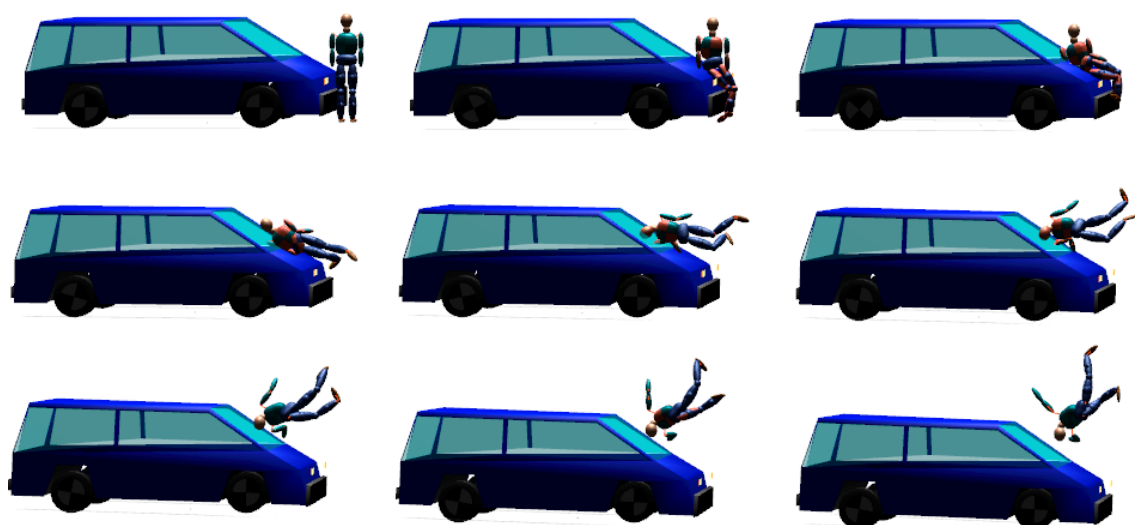


Figura 5.24 – Secuencia de atropello en la Configuración 4 a 50 km/h, para el monovolumen. El tiempo representado es de 240 ms



**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 4**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	20 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	40 km/h
Salto mortal (somersault)	40 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.47 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	2.92 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	16.7 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m

**Tabla 5.7 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 4 para el monovolumen**

**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 7**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	20 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	30 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	40 km/h
Salto mortal (somersault)	40 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.53 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	3 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	16.8 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.7 m

**Tabla 5.8 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 7 para el monovolumen**

### 5.3.2.3 Tipologías de Atropello para un SUV

#### **CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 2**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	30 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	40 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.64 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	6.3 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.58 m

Tabla 5.9 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 2 para el SUV

#### **CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 4**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	20 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	10-80 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.17 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.93 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	12.7 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m

Tabla 5.10 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 4 para el SUV

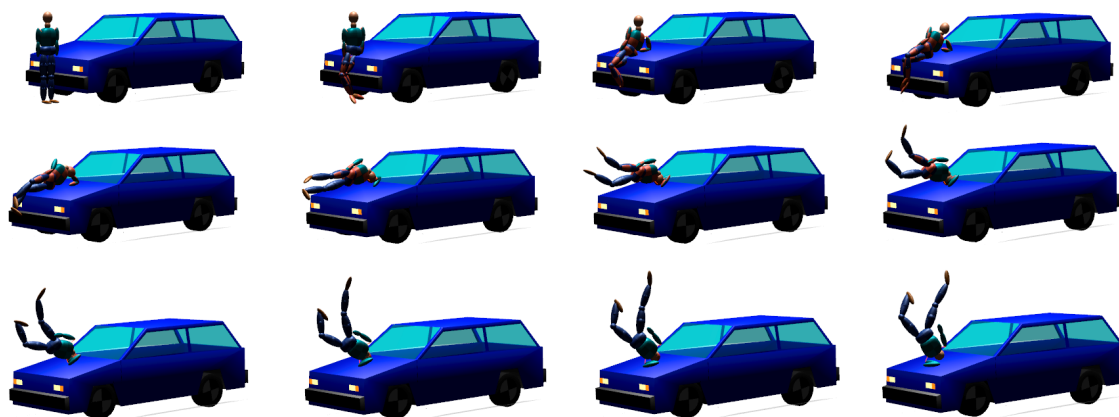


Figura 5.25 – Secuencia de atropello en la Configuración 4 a 40 km/h, para el SUV. El tiempo representado es de 330 ms

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 7

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	10-80 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	50 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.18 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.88 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	11.7 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.4 m

Tabla 5.11 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 7 para el SUV

### 5.3.2.4 Tipologías de Atropello para un Deportivo

#### **CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 2**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	40 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	20 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	-
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.6 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	Despreciable
Distancia recorrida en dirección longitudinal	4.75 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.6 m

Tabla 5.12 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 2 para el deportivo

#### **CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 4**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	40 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.1 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.7 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	11.5 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m

Tabla 5.13 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 4 para el deportivo

## CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 7

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	40 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	50 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.1 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.55 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	11 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.15 m

Tabla 5.14 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 7 para el deportivo

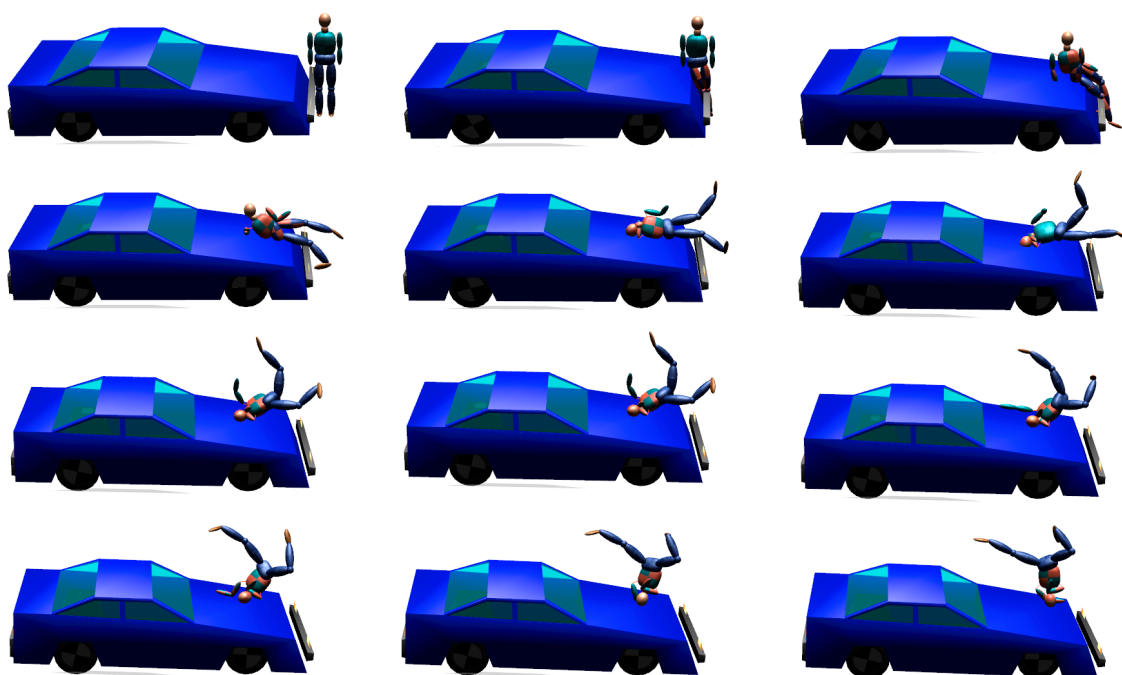


Figura 5.26 – Secuencia de atropello en la Configuración 7 a 50 km/h, para el deportivo. El tiempo representado es de 300 ms

### 5.3.2.5 Tipologías de Atropello para un Furgón comercial

#### **CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 2**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-20 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	20 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	80
Salto mortal (somersault)	60 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.07 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.93 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	12.4 m
Distancia recorrida en dirección transversal	3.7 m

Tabla 5.15 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 2 para el furgón comercial

#### **CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 4**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	20 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	60 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.17 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	2.07 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	16.9 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m

Tabla 5.16 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 4 para el furgón comercial

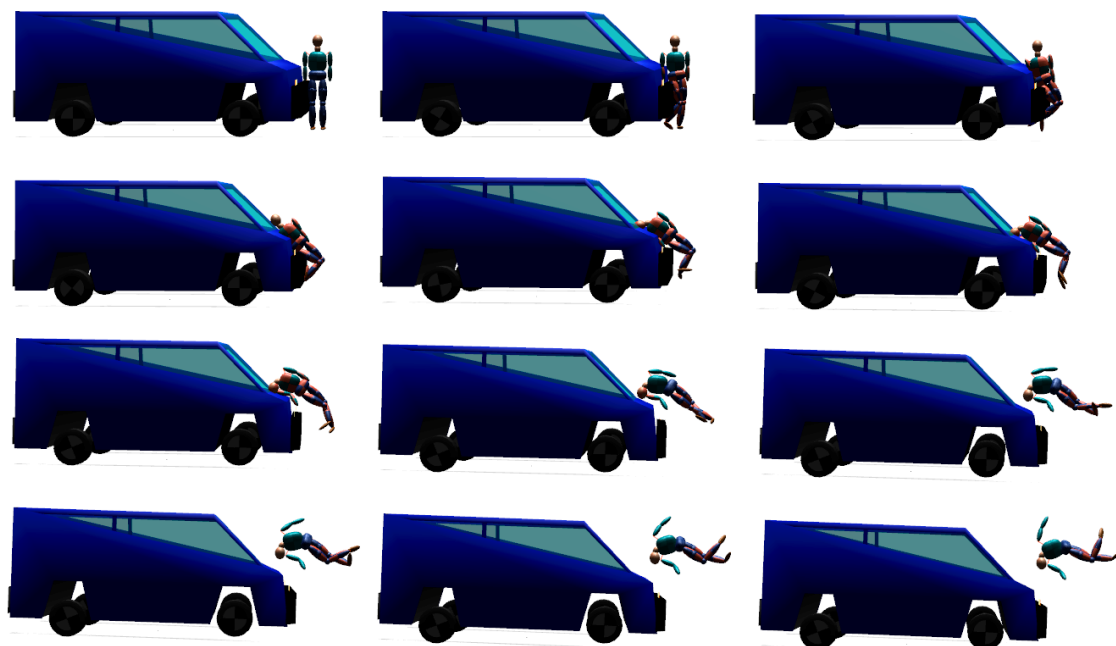


Figura 5.27 – Secuencia de atropello en la Configuración 4 a 50 km/h, para el furgón comercial. El tiempo representado es de 270 ms

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 7

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	20 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	60 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.25 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	2.4 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	18.2 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.35 m

Tabla 5.17 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 7 para el furgón comercial

### 5.3.2.6 Tipologías de Atropello para un Camión

#### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 2

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	-
Proyección hacia delante (forward projection)	10-80 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	-
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.67 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	Despreciable
Distancia recorrida en dirección longitudinal	2.6 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.95 m

Tabla 5.18 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 2 para el camión

#### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 4

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	-
Proyección hacia delante (forward projection)	10-80 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	-
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.5 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	Despreciable
Distancia recorrida en dirección longitudinal	8.3 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m

Tabla 5.19 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 4 para el camión



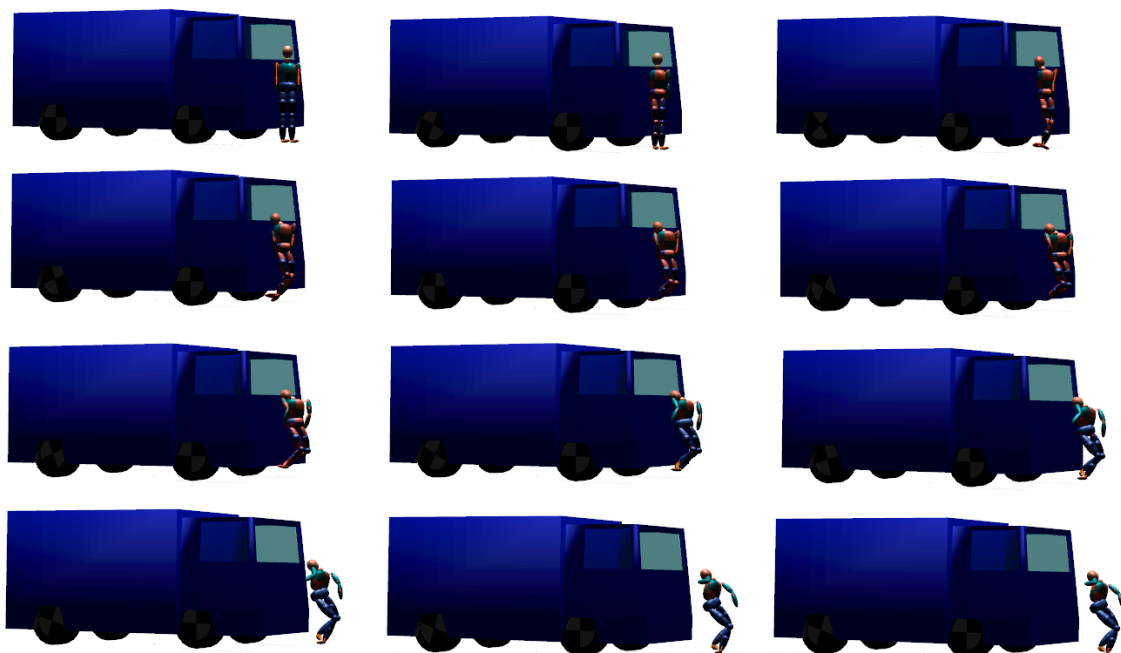


Figura 5.28 – Secuencia de atropello en la Configuración 4 a 50 km/h, para el deportivo. El tiempo representado es de 210 ms

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 7

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	-
Proyección hacia delante (forward projection)	10-80 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	-
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.5 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	Despreciable
Distancia recorrida en dirección longitudinal	8 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0.3 m

Tabla 5.20 – Cuadro resumen de las tipologías de atropello de la Configuración 7 para el camión

### 5.3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En primer lugar, se analizan de forma independiente los resultados para cada uno de los vehículos ensayados, tras lo cual se incluyen algunas conclusiones extraídas a partir de las simulaciones realizadas en este apartado del Proyecto.

#### ***Turismo medio***

Según se observa, la tipología de trayectoria de envolvimiento puede verse en todas las configuraciones y para cualquier velocidad de las ensayadas, excepto en la número 5, ya que el peatón está situado muy próximo al extremo lateral del vehículo, siendo el contacto mínimo. Este hecho posiblemente esté dado por la geometría progresiva y suavizada del frontal del vehículo, con una zona del parachoques baja que impulsa las piernas hacia arriba, a la vez que la cadera y el torso entran en contacto con el capó del vehículo. La tipología de proyección comienza a observarse a partir de 30 km/h en los casos en los que se da, debido a que al tratarse de un atropello con una frenada de emergencia, a velocidades inferiores el vehículo se detiene rápidamente mientras el cuerpo del peatón realiza la trayectoria de envolvimiento sobre el capó, deslizándose por éste una vez que el vehículo se ha detenido. La posición del peatón y la velocidad de éste perpendicular al frontal tienen una gran influencia en la posibilidad de que se dé la tipología de volteo sobre la aleta. Las dos últimas tipologías de atropello, la de volteo sobre el techo y la de salto mortal, describen movimientos del peatón en los que son necesarios un gran impulso, sobre todo de las extremidades inferiores, para poder elevar el resto del cuerpo por encima de la altura del vehículo y permitir el salto mortal. Por esta razón, es necesaria una velocidad en torno a 40-50 km/h para que puedan ser observadas, en aquellas configuraciones en las que el cuerpo del peatón recibe el impacto plenamente y no sólo en una pequeña zona.

La altura y distancia de proyección durante el vuelo están relacionadas con la aparición de la tipología roof vault y somersault (volteo sobre el techo y salto mortal). Cuando éstas se producen, el vuelo es más largo y alto, destacando en los casos analizados a 50 km/h, aquellos en los que el peatón es alcanzado de forma frontal (Configuración 1 y 3), probablemente debido a que el cuerpo del peatón al ser alcanzado de esta manera se flexiona, “recogiéndose sobre sí mismo”, de forma que alcanza más altura y tarda más tiempo en tocar el suelo.

#### ***Monovolumen***

La trayectoria de envolvimiento en el caso del monovolumen es apreciable en casi todas las configuraciones y para todo el rango de velocidades, excepto en el caso de la Configuración 8, que comienza a verse con claridad a partir de 40 km/h. Con respecto a la tipología de proyección hacia delante, el rango de velocidades mínimas para que se produzca es muy amplio, dependiendo principalmente de la posición del peatón frente al vehículo, y por tanto no es posible extraer una clara relación entre esta

tipología de atropello y velocidad, ya que existe otra variable que afecta a los resultados. El volteo sobre la aleta únicamente es posible cuando el peatón se sitúa cerca del extremo lateral del vehículo o cuando se está moviendo en perpendicular a éste, siendo las velocidades de colisión necesarias muy bajas, en torno a 10 o 20 km/h, según la configuración. La geometría de la parte delantera del monovolumen, formada por un capó y un parabrisas-pilar A inclinados en un mismo ángulo, produce que el cuerpo del peatón sea impulsado hacia arriba, lo que facilita que aparezca la tipología de volteo sobre el techo a una velocidad de tan sólo 30 km/h, aunque la altura del vehículo sea de 1.74 m. Esto sólo ocurre en la Configuración 1, ya que en el resto de configuraciones es necesaria una velocidad superior. Para que se produzca el salto mortal del peatón la velocidad debe ser superior a 40 o 50 km/h, aunque en el caso de la Configuración 5 es necesario una velocidad de 60 km/h.

De nuevo, la peculiar geometría frontal puede explicar los largos vuelos descritos por el peatón tras el atropello a 50 km/h, ya que provoca que el cuerpo salga impulsado con un amplio ángulo respecto la horizontal, alcanzando una gran distancia. Es posible destacar que cuando el peatón es alcanzado de forma frontal, por la espalda, la distancia recorrida hasta que toca el suelo es muy superior a los otros casos en los que la orientación del peatón es lateral.

## **SUV**

A pesar de tratarse de un vehículo SUV, o también llamado todocamino, la altura del frontal no es excesivamente grande y la inclinación del capó posibilita que, a velocidades bajas se puede observar las tipologías de envolvimiento y de proyección hacia delante a la vez. El volteo sobre la aleta o tipología fender vault, solamente puede verse a partir de 10-20 km/h cuando el peatón se encuentra situado en el borde del frontal del vehículo y es alcanzado por la espalda, o cuando se mueve lateralmente respecto al vehículo antes de recibir el impacto. Para que pueda darse la tipología de volteo sobre el techo, es decir, que el cuerpo supere al menos la altura máxima del vehículo, es necesario una elevada velocidad, de 50-60 km/h en la mayoría de los casos, debido a que el impacto del vehículo se produce a una altura mayor de las extremidades inferiores, lo que provoca que el cuerpo sea elevado en menor grado. A partir de 40 km/h, y dependiendo de la orientación del peatón es posible ver como éste describe los movimientos de la tipología de salto mortal.

La distancia recorrida media durante el vuelo tras el atropello se sitúa en torno a 10.5 m., no existiendo grandes diferencias entre las distintas configuraciones, salvo en el caso de la Configuración 1, que destaca con 13.85m. y 2.75m. de altura.

### **Deportivo**

La baja altura del frontal unido al largo capó hacen que el cuerpo del peatón describa la trayectoria de envolvimiento desde 10 km/h en la mayoría de las configuraciones de atropello. Este mismo aspecto dificulta que se pueda ver la tipología de proyección, requiriendo una mayor velocidad, ya que tras el impacto, y mientras el vehículo decelera, el cuerpo describe un amplio giro hasta chocar con el capó, sin sufrir una clara proyección. Es a partir de 40 km/h, en todos los casos excepto en uno, cuando es posible apreciar claramente la proyección. En las configuraciones en las que pueden darse la tipología de volteo sobre la aleta, es decir, aquellas en las que el peatón se encuentra cerca del borde lateral del frontal o en movimiento, no puede destacarse una velocidad mínima predominante puesto que en algunas de ellas son necesarias velocidades elevadas para poder identificar la tipología, y en otras es visible a partir de 10 km/h. Se puede destacar que a partir de 50 km/h es posible identificar el volteo sobre el techo en la mayoría de las configuraciones en las que esta tipología es posible, puesto que el vehículo dispone de una escasa altura que puede ser sobrepasada con facilidad. Respecto al salto mortal, de nuevo la velocidad de 50 km/h resulta suficiente para que pueda ser observado, aunque cuando el peatón es alcanzado por detrás, la velocidad debe ser superior.

Tanto la distancia máxima recorrida horizontalmente, como el tiempo de vuelo, son muy similares para todas las configuraciones salvo la número 2, 5 y 8, situándose el vuelo alrededor de 11.7 m. y 1.1 segundos.

### **Furgón Comercial**

La geometría especial de este tipo de vehículos en los que la línea del capó es elevada, y éste a su vez es prácticamente inexistente, provoca que a muy baja velocidad, y en todas las configuraciones, aparezca la proyección hacia delante. Por este mismo motivo, la trayectoria de envolvimiento puede ser observada en todas las configuraciones propuestas, y a cualquier velocidad, aunque la trayectoria descrita por el cuerpo no sea excesivamente amplia. El volteo sobre la aleta, a pesar de que ésta posee una escasa longitud, puede verse desde las menores velocidades en aquellas configuraciones en las que el peatón se mueve perpendicularmente, o bien es alcanzado por el vehículo tan solo en una mitad de su cuerpo. Además de la proyección hacia delante, el ángulo del conjunto parabrisas-capó, provoca una fuerte proyección hacia arriba, lo que permite describir las trayectorias de volteo sobre el techo y de salto mortal, aunque es necesaria una velocidad muy elevada, hasta de 80 km/h en alguna configuración, para conseguir la primera trayectoria, o en torno a 50-60 para conseguir la segunda.

Debido a la proyección combinada que sufre el peatón, éste alcanza una gran distancia en horizontal, destacando las producidas cuando sufre el atropello según las Configuraciones 1 y 5, en las que se alcanzan los 20 metros de distancia horizontal.

## **Camión**

El frontal casi vertical del camión, en el que destaca la ausencia de capó inclinado, provoca que prácticamente la única tipología de atropello observada sea la de proyección hacia delante, dada para todas las configuraciones de atropello consideradas, y para todo el rango de velocidades simuladas. En las Configuraciones 2, 3, 5 y 6, aparece un movimiento del peatón rodeando la esquina del frontal del vehículo, que podría ser identificable como un volteo sobre la aleta, y que se observa para todas las velocidades ensayadas.

Debido a la fuerte proyección hacia delante y la ausencia de inclinación en el frontal del vehículo, el peatón sufre una importante proyección horizontal hasta caer al suelo, destacando que en todos los casos la altura ganada por el peatón es despreciable o nula. Al no elevarse el cuerpo, y no realizar una trayectoria parabólica, el cuerpo tras chocar contra el suelo a una gran velocidad, permanece arrastrándose por éste durante decenas de metros hasta detenerse.

### **5.3.3.1 Conclusiones**

Tras realizar el análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones, es posible extraer las siguientes conclusiones:

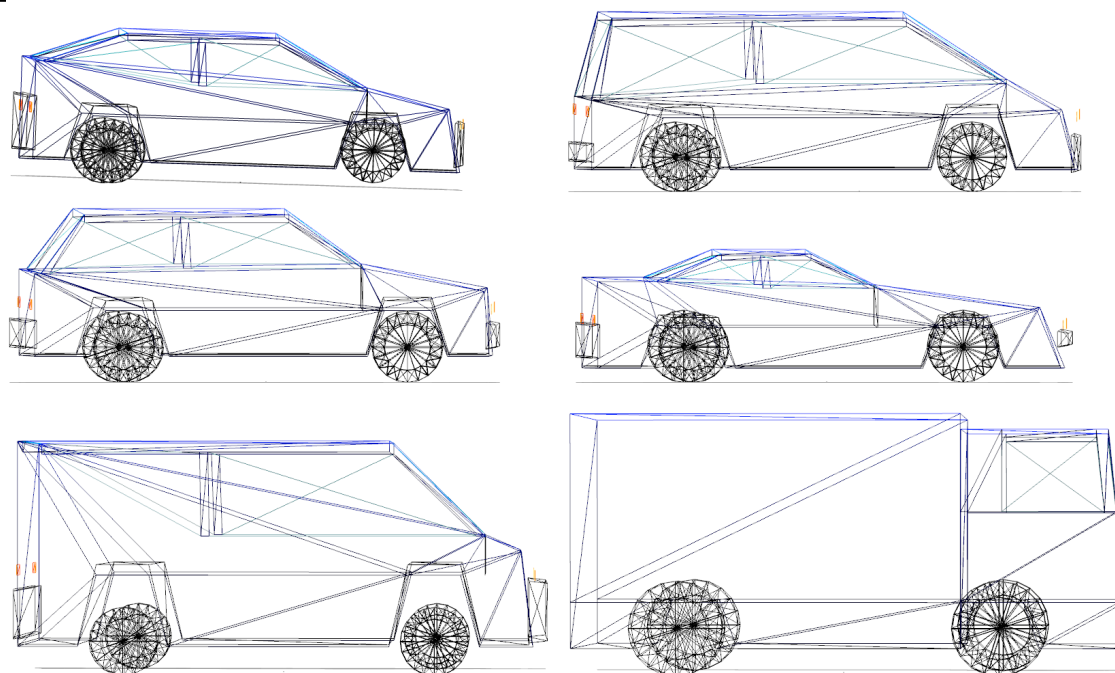
- ♦ Las simulaciones han mostrado que un atropello es un suceso muy complejo, en el que el peatón tras sufrir el impacto del vehículo, es desplazado en el espacio siguiendo trayectorias muy variadas, con movimientos desordenados de la mayoría de segmentos corporales.
- ♦ Debido a esta complejidad de movimientos, resulta difícil poder identificar de forma aislada cada una de las cinco tipologías de atropello consideradas. En su lugar, parece más acertado afirmar que cuando se produce un atropello, la cinemática del cuerpo del peatón se describe de mejor forma considerando que la tipología dada es el resultado de la combinación de dos o más de las tipologías teóricas. En ocasiones, como se ha visto, a partir de una cierta velocidad, es posible identificar en el mismo atropello, una combinación de movimientos que se corresponden con los cinco tipos de atropellos.
- ♦ La identificación de las tipologías de atropello supone un proceso basado en la subjetividad del individuo, que unido a las definiciones de cada tipología, en algunos casos, poco detalladas, puede provocar errores a la hora de interpretar los resultados y realizar la identificación. En el caso de la tipología de salto mortal, la colocación del peatón respecto al frontal de un mismo vehículo puede hacer que durante el vuelo, el eje de giro del cuerpo no permanezca horizontal, provocando que el cuerpo no realice un salto mortal típico, sino que realiza una variante de éste, aunque en estos casos pueda ser identificado como tal.

- ♦ Se ha observado como además de la velocidad y la geometría del vehículo, la posición relativa del peatón tiene una gran influencia en los movimientos de viandante atropellado.
- ♦ Al considerar en las simulaciones una secuencia de frenada, tanto antes del impacto como después, se ha podido observar como en ningún caso el vehículo sobrepasa al peatón durante el vuelo, cosa que sucedería si el vehículo no frenase y el peatón fuese impulsado por encima de la altura máxima del vehículo. Sólo en algunos casos de los ensayados el vehículo sobrepasa al peatón, pero esto se produce mientras el cuerpo se arrastra por el suelo y el vehículo aún no se ha detenido.
- ♦ Las velocidades mínimas o límite para que sea posible cada una de las tipologías de atropello son orientativas y aproximadas, debido a que el incremento de velocidad entre una y otra simulación es relativamente elevado. Al trabajar con un número elevado de simulaciones y ficheros, y a la vez limitado, se ha optado por intentar abarcar el máximo rango de velocidades posible, para lo cual ha sido necesario emplear un incremento en la velocidad de 10 km/h..
- ♦ Del análisis de los valores de desplazamiento producidos tras un atropello a 50 km/h, es posible concluir lo siguiente:
  - A pesar de que el atropello se produzca con un mismo vehículo y a una misma velocidad, la posición y orientación del peatón son factores determinantes en los resultados. Existe una gran disparidad en los desplazamientos tanto en la dirección de movimiento del vehículo como en la dirección perpendicular a ésta.
  - Según se ha observado, los vehículos cuyos parabrisas poseen un mayor ángulo de inclinación, y la longitud del capó es pequeña o bien posee la misma inclinación que el parabrisas, provocan los vuelos de mayor longitud. Estos vehículos son el monovolumen y el furgón comercial.
  - Los parámetros del vuelo posterior al impacto únicamente han sido considerados desde el momento de la colisión hasta que el cuerpo del peatón choca contra el suelo. Sin embargo hay que tener en cuenta que una vez el peatón se encuentra en el suelo, éste aún continúa arrastrándose hasta su completa detención, incluso pudiendo sufrir repetidos rebotes. En algunos atropellos, como los provocados por el camión, la posición del

peatón tras detenerse por completo puede diferir en varias decenas de metros respecto al punto de la colisión con el suelo, debido a la baja altura alcanzada y el gran impulso aplicado.

- Las diferencias observadas entre los puntos donde el peatón cae al suelo tras el atropello, lleva a pensar que este tipo de simulaciones con diferentes vehículos, posiciones y orientaciones del peatón, e incluso velocidades, pueden ser de gran utilidad en la investigación posterior a los accidentes. Ya que a partir de la posición final del peatón puede llegar a estimarse muchos de los parámetros del atropello, como son la velocidad del impacto, o la posición del peatón, modificando las simulaciones hasta lograr reproducir los resultados del atropello real.
- ♦ Cuando se tratan las tipologías de atropello, se indican algunos valores aproximados de las velocidades necesarias para que se den cada una de ellas. Sin embargo, como se ha podido apreciar tras realizar las simulaciones y su posterior análisis, el gran número de variables que intervienen en un fenómeno tan complejo como es un atropello, lleva a pensar que dependiendo del vehículo, velocidad y peatón implicado, estas velocidades estimadas pueden no ser del todo correctas.
- ♦ Además de la gran influencia de la geometría del vehículo observada en los resultados referidos a la cinemática del peatón tras el atropello, resulta fácil suponer que empleando modelos de peatones de diferente estatura o complexión, los resultados obtenidos pueden variar de forma importante.
- ♦ La simulación de diferentes configuraciones de atropello, consideradas de formas más o menos arbitrarias, ha servido para demostrar que el punto y la forma en la que el vehículo alcanza al peatón influye en gran medida en los resultados obtenidos.
- ♦ A pesar de que el programa impide trabajar con modelos de vehículos de geometría más detallada, la modificación de los valores geométricos ha permitido observar diferencias en las simulaciones, demostrando que la forma del frontal es una de las variables más importantes en un atropello.





**Figura 5.29 – Comparativa de la geometría lateral de los seis modelos de vehículos empleados en las simulaciones**

- ◆ Se han comparado los resultados obtenidos entre los diferentes vehículos ensayados llegando a las siguientes conclusiones:
  - A excepción del caso del camión, en el resto de vehículos, y en la mayoría de las configuraciones de atropello consideradas, la tipología de envolvimiento puede ser identificada. Además, aparece en todo el rango de velocidades. Esto es debido posiblemente a que la altura del peatón es lo suficientemente grande para que cuando recibe el impacto en las extremidades inferiores, su parte superior del cuerpo gire hacia el vehículo entrando en contacto con el capó o el parabrisas, según los casos. La geometría del perfil con cierta inclinación permite que en el giro del cuerpo, el peatón vaya progresivamente entrando en contacto con toda esta geometría. En el único caso donde no es posible apreciar este tipo de tipología es en el camión, debido a la inexistencia de un capó inclinado y al frontal casi vertical.
  - Como ya se ha dicho, para que la tipología de volteo sobre la aleta sea posible es necesario que el peatón sea alcanzado por un punto muy próximo al borde lateral del vehículo, o que el sujeto se encuentre en movimiento perpendicular al vehículo en el momento del atropello.
  - Se ha identificado la proyección hacia delante del peatón en muchas de las simulaciones, aunque se aprecia como la altura del cuerpo puede ser el



factor más determinante para esta tipología de atropello. De haber empleado vehículos más altos o un peatón de menos altura, se hubiese podido observar la tipología de proyección de forma aislada, y no en combinación con otras.

- Debido al número de variables que intervienen en el atropello y que condicionan la tipología de cada atropello, es posible en la mayoría de los casos, reproducir cualquiera de ellas, modificando cada una de estas variables hasta conseguir la tipología deseada. Únicamente en el caso del camión, este propósito sería muy difícil de cumplir, ya que la geometría tan restrictiva impide que a pesar de que fuesen modificadas la velocidad de impacto, la posición y estatura del peatón, algunas de las tipologías no podrían conseguirse.
- Las tipologías de volteo sobre el techo y la de salto mortal son en las que mayor impulso es necesario, lo que implica una mayor velocidad en la colisión. Este aspecto es algo común para todos los vehículos en los que son posibles estas tipologías, como puede verse en las tablas de resultados. A pesar de las diferencias entre los vehículos y las configuraciones de atropello consideradas, puede observarse como en la mayoría de los casos se requieren velocidades superiores a 40 km/h para que se produzcan, existiendo algunas configuraciones que requieren velocidades superiores.
- Todas las simulaciones de atropello se han realizado considerando una secuencia de frenada, lo que favorece que se den algunas tipologías específicas como la de proyección hacia delante o la de envolvimiento. Del mismo modo, si se simulasen atropellos sin frenada, e incluso con secuencia de aceleración, podría verse como otras tipologías de las indicadas, serían reproducidas con mayor facilidad. Estos son los casos del volteo sobre la aleta o sobre el techo, en los que el vehículo sobrepasaría al peatón en la mayoría de los casos.

## 5.4 DETERMINACIÓN DEL DAÑO SUFRIDO POR UN PEATÓN EN UN ATROPELLO A 50 km/h

Tras haber realizado una breve descripción de la cinemática del peatón cuando sufre un atropello, indicando las posibles tipologías de atropello que pueden darse en función de la velocidad del vehículo y su geometría, así como los distintos desplazamientos sufridos por el cuerpo del peatón, en este apartado se pretende conocer de una forma aproximada el daño sufrido por el peatón. Para esto, se han realizado una serie de simulaciones de forma similar a las llevadas a cabo en el apartado anterior, a partir de las cuales poder conocer, si es posible, cuál de las diferentes configuraciones de atropello resulta más dañina para el peatón, o qué segmento corporal puede resultar dañado más gravemente, en función del vehículo implicado en el atropello.

La decisión de simular únicamente los atropellos ocurridos a 50 km/h se apoya en varios aspectos, que se indican a continuación:

- ♦ La velocidad es una de las muchas variables que intervienen en un atropello, y por tanto, para poder analizar fácilmente las posibles consecuencias de un atropello, en este caso, el daño causado, es necesario limitar su número. Por este motivo se ha decidido considerar diferentes configuraciones de atropello, pero manteniendo el valor de la velocidad constante en todas las simulaciones. De este modo tras las simulaciones, los resultados pueden ser analizados más fácilmente al poder ser comparados los daños causados por diferentes vehículos en configuraciones de atropello similares. También puede determinarse para cada vehículo la configuración vehículo-peatón que causa mayores daños.
- ♦ De entre las diferentes velocidades posibles, y ensayadas anteriormente, se ha seleccionado 50 km/h por tratarse de la máxima velocidad permitida en ciudad, que es donde mayor repercusión tienen los atropellos de peatones. De esta forma, pueden conocerse de forma aproximada el daño que sufriría un peatón atropellado en ciudad a la máxima velocidad legal permitida.

### 5.4.1 Preparación de las simulaciones

Al igual que en el bloque de simulaciones dedicadas a la determinación de la tipología del atropello, en este caso también se han realizado una serie de simulaciones manteniendo los mismos parámetros de simulación para poder ser comparadas y analizadas de forma global. Se han empleado los seis vehículos modelizados para simular atropellos a 50 km/h con la misma secuencia de frenada considerada en las anteriores simulaciones. Aunque sólo se han considerado estas simulaciones para analizar los resultados, también se han llevado a cabo las mismas simulaciones sin la mencionada secuencia de frenada, que han sido incluidas en el DVD junto con el resto de archivos.

Para tener un mínimo de simulaciones correspondientes a cada vehículo se han considerado cinco configuraciones de atropello, de forma que sea posible identificar si en alguna de ellas aparece un mayor daño en el cuerpo del peatón. En cada una de las configuraciones empleadas en esta fase de la simulación, el peatón se ha situado en una orientación diferente respecto al vehículo, aunque siempre en el centro del frontal del vehículo, aproximadamente. De esta forma se evita en gran medida que el cuerpo del peatón pueda impactar en algunas ocasiones contra la parte lateral del vehículo, o aleta, y la zona del pilar A del mismo, dificultando la comparación de los resultados. Además de la orientación del peatón, también se han considerado diferentes posturas, de forma que se tengan en cuenta en las simulaciones distintas posibilidades en las que puede darse un atropello. En la Tabla 5.21 se muestran y se nombran las cinco configuraciones utilizadas en este apartado del Capítulo 5.

La postura en la que se simula que el peatón está caminando se ha configurado en el menú multicuerpo del programa. Durante el proceso de simulación, se han realizado pruebas alternando la pierna adelantada, tras las cuales se ha llegado a la conclusión de que no se aprecian diferencias importantes en ninguno de los casos, y por tanto la pierna adelantada no tiene una gran influencia. Aún así, se ha elegido la postura con la pierna izquierda adelantada para disminuir el número de variables consideradas en cada simulación, de forma que sean lo más homogéneas posibles y la comparación de resultados pueda llevarse a cabo fácilmente.

Los archivos de las simulaciones empleadas junto con las no utilizadas se incluyen en un disco de datos, para poder ser consultadas con posterioridad.

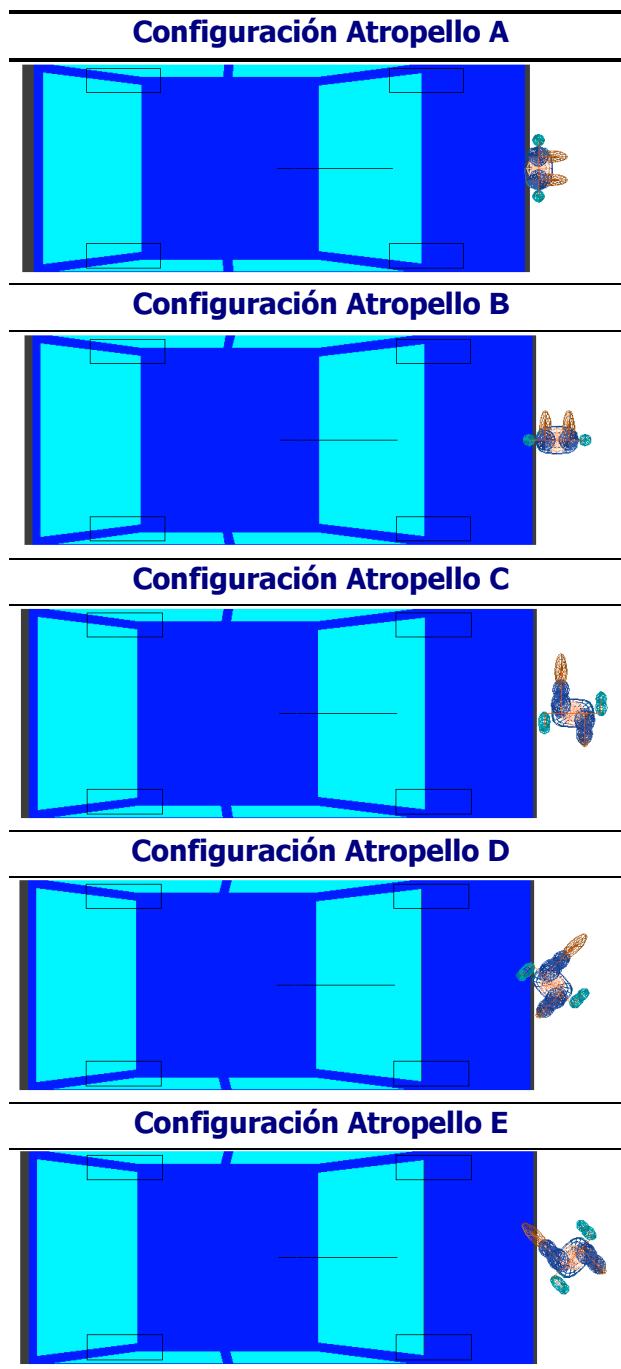


Tabla 5.21 – Configuraciones de vehículo-peatón empleadas para las simulaciones de evaluación de la tipología de atropello

## 5.4.2 Resultados

Para llevar a cabo el proceso de determinación del daño sufrido por un peatón durante un atropello a 50 km/h se ha empleado la función del programa PC-CRASH que permite la obtención de diversos resultados en forma gráfica de los sistemas multicuerpo, como es el caso del modelo de peatón empleado en las simulaciones. Entre los diferentes parámetros de los cuales es posible obtener resultados gráficos en función del tiempo, los más adecuados para evaluar el posible daño que puede sufrir un peatón atropellado son, las fuerzas de contacto y la aceleración. Los valores de estos parámetros pueden ser seleccionados individualmente para cada uno de los multicuerpo del peatón, mostrándose con curvas de distinto color, perfectamente identificables. Además, es posible representar tanto la resultante total del parámetro seleccionado para cada uno de los multicuerpos, así como las componentes en los tres ejes coordinados ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), en el caso de que la magnitud representada tenga un carácter vectorial.

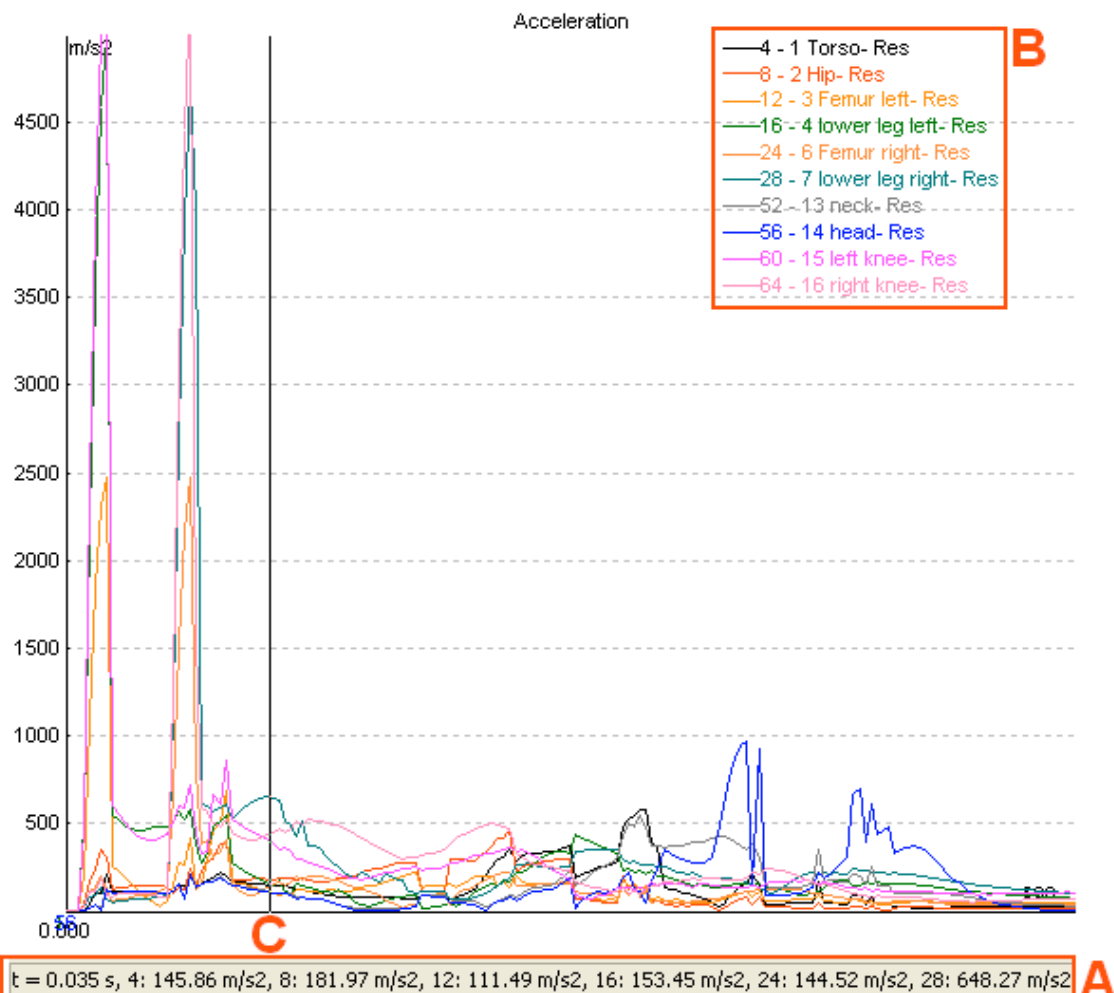
De los veinte segmentos que forman el modelo de peatón, únicamente se han considerado los resultados de aquellas zonas del cuerpo que se ven afectadas en mayor grado en los atropellos, como son cabeza, extremidades inferiores y pecho, o las partes del cuerpo cuyas heridas son consideradas de mayor gravedad como la pelvis o cadera. Por este motivo se ha tomado la decisión de no tener en cuenta, a efectos de los resultados, ni las extremidades superiores, ni los pies, consiguiendo además de forma adicional, reducir el número de segmentos corporales considerados, y por consiguiente, facilitar el análisis de los resultados.

Como se ha indicado anteriormente, el modelo de peatón empleado cuenta en sus extremidades inferiores con unos cuerpos especialmente considerados para registrar las fuerzas de contacto con el vehículo, además de los cuerpos que representan la pierna del peatón con una forma y dimensiones aproximadas. Se han incluido los resultados de todos estos cuerpos ya que dependiendo de la orientación del peatón y sobre todo de la geometría del vehículo, en algunos de los segmentos o cuerpos es posible que no se registran fuerzas de contacto, y de esta forma es seguro recopilar al menos algunos datos de las extremidades inferiores.

Las magnitudes consideradas para todos los segmentos son las resultantes totales de las fuerzas de contacto y de la aceleración, puesto que al ser un atropello un fenómeno complejo, no existe una componente predominante de estas magnitudes. El proceso de recopilación de los resultados numéricos se ha llevado a cabo de forma manual, a partir de los gráficos generados, ya que en el caso de los sistemas multicuerpo, los resultados no pueden ser exportados en forma de fichero de texto o de otro tipo. A pesar de que el programa muestra los valores para cada parámetro seleccionado según el tiempo de simulación, este valor es muy sensible a la elección del tiempo

mediante el uso del ratón, y por este motivo los resultados son aproximados, aunque la variación respecto al valor real calculado puede ser considerada de mínima.

Para mostrar este proceso se incluye, a modo de ejemplo, el Gráfico 5.5 donde puede verse uno de los gráficos empleados para completar las tablas de resultados.



**Gráfico 5.5 – Ejemplo de la recopilación manual de datos a partir de los resultados gráficos ofrecidos por PC-CRASH**

Todas las tablas de resultados correspondientes a los seis vehículos y las cinco configuraciones de atropello, muestran los valores de la variable seleccionada, así como la zona del vehículo con la que colisiona cada una de las partes del cuerpo del peatón.

Los valores de aceleración ofrecidos por el programa están en unidades del Sistema Internacional, es decir, en  $m/s^2$ . Sin embargo, se ha realizado un cambio de variable para que aparezcan indicados en términos de  $g$ 's, ya que es la unidad más empleada cuando se presentan resultados de aceleración producida en fuertes aceleraciones o impactos.

Tras completar todas las tablas y analizando algunos de los gráficos de resultados tanto de las fuerzas de contacto como de las aceleraciones se han comprobado como a pesar de que los valores no son proporcionales a la masa del segmento, probablemente debido a que son consideradas otro tipo de fuerzas como las de inercia, sí que existe cierta correspondencia en los tiempos en los que aparecen los valores máximos de las dos magnitudes. Además de esto, se ha comprobado como la geometría del frontal del vehículo tiene una gran influencia en los resultados de las fuerzas de contacto, tanto en el valor máximo de éstas, y los tiempos en los que se producen, así como en los segmentos afectados. Este es un aspecto importante a considerar ya que produce en algunos casos que no pueda registrarse ningún tipo de fuerza de contacto, y en otros, que los valores sean excesivamente elevados, lo que indica posibles errores de cálculo, como se indica en el manual del programa.

En el caso de la aceleración no se observan grandes diferencias cuando, para un mismo vehículo, la geometría del frontal es modificada. Por este motivo, el análisis del daño producido durante un atropello a 50 km/h a un peatón, se ha considerado empleando principalmente los valores de la aceleración, aunque las fuerzas de contacto también se han tenido en cuenta para evaluar las zonas de contacto en el vehículo, así como el tiempo en el que cada segmento corporal considerado colisiona contra el vehículo y el suelo.

En las páginas siguientes se recogen las tablas donde se indican, para los seis vehículos, los resultados de las cinco configuraciones de atropello simuladas. En uno de los anexos de este documento se incluyen las tablas donde se recopilan las fuerzas de contacto obtenidas de los ensayos, donde se especifican el instante de tiempo en el cual se registra el valor, y la zona del vehículo que entra en contacto con cada una de las partes del cuerpo del peatón.

### 5.4.2.1 Daño producido por un Turismo medio

	CONFIGURACIÓN A		CONFIGURACIÓN B		CONFIGURACIÓN C		CONFIGURACIÓN D		CONFIGURACIÓN E	
Segmento Corporal	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto
<b>Cabeza</b>	95	Parabrisas	76	Parabrisas	99	Parabrisas	101	Parabrisas	137	Parabrisas
<b>Cuello</b>	117	Parabrisas	61	Parabrisas	55	Parabrisas	115	Parabrisas	94	Parabrisas
<b>Torso</b>	101	Parabrisas/Capó	58	Parabrisas/Capó	59	Capó	68	Parabrisas/Capó	59	Capó
<b>Cadera</b>	90	Capó	64	Capó	47	Capó	48	Capó	65	Capó
<b>Muslo Izquierdo</b>	213	Parachoques/Capó	206	Parachoques/Capó	251	Parachoques/Capó	221	Parachoques/Capó	206	Parachoques/Capó
<b>Muslo derecho</b>	213	Parachoques/Capó	249	-	248	Capó	173	Capó	141	-
<b>Rodilla Izquierda</b>	561	Parachoques	537	Parachoques	531	Parachoques	465	Parachoques	438	Parachoques
<b>Rodilla Derecha</b>	561	Parachoques	384	Parachoques	520	Parachoques	389	Parachoques	271	Parachoques
<b>Pantorrilla Izquierda</b>	395	Parachoques	496	Parachoques	503	Parachoques	312	Parachoques	404	Parachoques
<b>Pantorrilla Derecha</b>	395	Parachoques	164	-	471	Parachoques	463	Parachoques	300	Parachoques

Tabla 5.22 – Resultados del daño producido en el atropello a 50 km/h con el turismo medio



### 5.4.2.2 Daño producido por un Monovolumen

	CONFIGURACIÓN A		CONFIGURACIÓN B		CONFIGURACIÓN C		CONFIGURACIÓN D		CONFIGURACIÓN E	
Segmento Corporal	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto
<b>Cabeza</b>	111	Parabrisas	84	Parabrisas	98	Parabrisas	93	Parabrisas	118	Parabrisas
<b>Cuello</b>	107	Parabrisas	48	-	57	Parabrisas	81	Parabrisas	73	Parabrisas
<b>Torso</b>	104	Parabrisas/Capó	54	Capó	62	Parabrisas/Capó	52	Parabrisas/Capó	78	Parabrisas/Capó
<b>Cadera</b>	88	Capó	65	Capó	66	Capó	55	Capó	79	Capó
<b>Muslo Izquierdo</b>	207	Parachoques/Capó	242	Parachoques/Capó	244	Parachoques/Capó	175	Parabrisas/Capó	180	Parabrisas/Capó
<b>Muslo derecho</b>	207	Parachoques/Capó	208	-	251	-	174	Parabrisas/Capó	136	-
<b>Rodilla Izquierda</b>	570	Parachoques	524	Parachoques	517	Parachoques	393	Parachoques	425	Parachoques
<b>Rodilla Derecha</b>	570	Parachoques	411	Parachoques	531	Parachoques	394	Parachoques	269	Parachoques
<b>Pantorrilla Izquierda</b>	429	Parachoques	477	Parachoques	482	Parachoques	313	Parachoques	485	Parachoques
<b>Pantorrilla Derecha</b>	429	Parachoques	213	-	486	Parachoques	464	Parachoques	339	Parachoques

Tabla 5.23 – Resultados del daño producido en el atropello a 50 km/h con el monovolumen

### 5.4.2.3 Daño producido por un SUV

	CONFIGURACIÓN A		CONFIGURACIÓN B		CONFIGURACIÓN C		CONFIGURACIÓN D		CONFIGURACIÓN E	
Segmento Corporal	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto
<b>Cabeza</b>	181	Capó	93	Capó	153	Capó	189	Capó	213	Capó
<b>Cuello</b>	86	Capó	69	-	71	Capó	100	Capó	85	Capó
<b>Torso</b>	55	Capó	68	Capó	37	Capó	59	Capó	41	Capó
<b>Cadera</b>	91	Capó	111	Capó	56	Capó	64	Capó	80	Capó
<b>Muslo Izquierdo</b>	174	Parachoques	215	Parachoques	214	Parachoques	290	Parachoques	217	Parachoques
<b>Muslo derecho</b>	174	Parachoques	225	-	238	Parachoques	227	Parachoques	172	-
<b>Rodilla Izquierda</b>	461	Parachoques	448	Parachoques	459	Parachoques	530	Parachoques	517	Parachoques
<b>Rodilla Derecha</b>	461	Parachoques	428	Parachoques	465	Parachoques	542	Parachoques	375	Parachoques
<b>Pantorrilla Izquierda</b>	247	Parachoques	241	Parachoques	439	Parachoques	419	Parachoques	668	Parachoques
<b>Pantorrilla Derecha</b>	247	Parachoques	408	Parachoques	255	Parachoques	357	Parachoques	266	Parachoques

Tabla 5.24 – Resultados del daño producido en el atropello a 50 km/h con el SUV

#### 5.4.2.4 Daño producido por un Deportivo

	CONFIGURACIÓN A		CONFIGURACIÓN B		CONFIGURACIÓN C		CONFIGURACIÓN D		CONFIGURACIÓN E	
Segmento Corporal	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto
<b>Cabeza</b>	258	Capó	155	Capó	303	Capó	257	Capó	331	Capó
<b>Cuello</b>	194	Capó	101	Capó	178	Capó	135	Capó	121	Capó
<b>Torso</b>	83	Capó	91	Capó	89	Capó	85	Capó	66	Capó
<b>Cadera</b>	148	Capó	98	Capó	106	Capó	115	Capó	137	-
<b>Muslo Izquierdo</b>	199	Parachoques/Capó	224	Parachoques/Capó	182	Parachoques/Capó	206	Parachoques/Capó	305	Parachoques/Capó
<b>Muslo derecho</b>	199	Parachoques/Capó	215	-	188	Parachoques/Capó	177	Parachoques/Capó	183	Parachoques/Capó
<b>Rodilla Izquierda</b>	357	-	442	Parachoques	415	Parachoques	478	-	478	Parachoques
<b>Rodilla Derecha</b>	357	-	456	-	329	-	353	-	270	Parachoques
<b>Pantorrilla Izquierda</b>	361	Parachoques	485	Parachoques	531	Parachoques	415	Parachoques	471	Parachoques
<b>Pantorrilla Derecha</b>	361	Parachoques	224	Parachoques	570	Parachoques	401	Parachoques	946	Parachoques

Tabla 5.25 – Resultados del daño producido en el atropello a 50 km/h con el deportivo

### 5.4.2.5 Daño producido por un Furgón Comercial

	CONFIGURACIÓN A		CONFIGURACIÓN B		CONFIGURACIÓN C		CONFIGURACIÓN D		CONFIGURACIÓN E	
Segmento Corporal	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto
<b>Cabeza</b>	149	Parabrisas	106	Parabrisas	98	Parabrisas	126	Parabrisas	111	Parabrisas
<b>Cuello</b>	135	Parabrisas	81	-	69	-	91	Parabrisas	120	Parabrisas
<b>Torso</b>	140	Capó	108	Capó	116	Capó	131	Capó	120	Capó
<b>Cadera</b>	124	Parachoques /Capó	94	Parachoques /Capó	97	Parachoques /Capó	106	Parachoques /Capó	98	Capó
<b>Muslo Izquierdo</b>	341	Parachoques	336	Parachoques	307	Parachoques	256	Parachoques	280	Parachoques
<b>Muslo derecho</b>	341	Parachoques	366	-	306	Parachoques	314	Parachoques	231	Parachoques
<b>Rodilla Izquierda</b>	550	Parachoques	627	Parachoques	566	Parachoques	353	-	565	Parachoques
<b>Rodilla Derecha</b>	550	Parachoques	645	Parachoques	620	Parachoques	569	Parachoques	531	Parachoques
<b>Pantorrilla Izquierda</b>	588	Parachoques	916	Parachoques	640	Parachoques	191	Parachoques	1118	Parachoques
<b>Pantorrilla Derecha</b>	588	Parachoques	346	-	479	Parachoques	881	Parachoques	366	Parachoques

Tabla 5.26 – Resultados del daño producido en el atropello a 50 km/h con el furgón comercial

### 5.4.2.6 Daño producido por un Camión

	CONFIGURACIÓN A		CONFIGURACIÓN B		CONFIGURACIÓN C		CONFIGURACIÓN D		CONFIGURACIÓN E	
Segmento Corporal	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto
<b>Cabeza</b>	142	Parabrisas	121	Parabrisas	120	Parabrisas	133	Parabrisas	138	Parabrisas
<b>Cuello</b>	174	Parabrisas	139	Parabrisas	133	Parabrisas	122	Parabrisas	136	Parabrisas
<b>Torso</b>	158	Capó	143	Capó	129	Capó	106	Capó	115	Capó
<b>Cadera</b>	184	Capó	163	Capó	119	Capó	154	Capó	144	Capó
<b>Muslo Izquierdo</b>	348	Parachoques	341	Parachoques	339	Parachoques	300	Parachoques	136	Parachoques
<b>Muslo derecho</b>	348	Parachoques	378	-	329	-	214	Parachoques	212	-
<b>Rodilla Izquierda</b>	629	Parachoques	650	Parachoques	642	Parachoques	343	Parachoques	432	Parachoques
<b>Rodilla Derecha</b>	629	Parachoques	649	Parachoques	590	Parachoques	330	Parachoques	423	Parachoques
<b>Pantorrilla Izquierda</b>	417	Parachoques	473	Parachoques	517	Parachoques	222	Parachoques	360	Parachoques
<b>Pantorrilla Derecha</b>	417	Parachoques	253	-	507	Parachoques	429	Parachoques	231	Parachoques

Tabla 5.27 – Resultados del daño producido en el atropello a 50 km/h con el camión

### 5.4.3 Análisis de resultados y conclusiones

Además de las tablas anteriores, se han realizado dos tablas adicionales, que aparecen a continuación, en las que se presentan los datos de los seis vehículos en conjunto, de forma que puedan ser comparados entre ellos de forma sencilla, y así el análisis de estas tablas permita determinar, si es posible, si existe algún vehículo que provoque atropellos más dañinos para el peatón.

Para evitar la influencia en los resultados que provoca la consideración de una sola configuración, se han tomado los valores de aceleración de cada una de las partes del cuerpo en cada configuración, obteniendo un valor medio de la aceleración. Esto se ha repetido para cada vehículo, obteniendo así la Tabla 5.28 en la que aparecen los valores de aceleración media que cada vehículo produce en los diferentes segmentos corporales.

La segunda de las tablas recoge los valores de la Configuración C para cada uno de los vehículos, ya que se ha considerado ésta como una configuración que representa un atropello típico en ciudad en el que el peatón es alcanzado por el vehículo de forma lateral mientras cruza una vía.

<b>Aceleración media máxima [g's]</b>						
	<b>Turismo</b>	<b>Monovolumen</b>	<b>SUV</b>	<b>Deportivo</b>	<b>Furgón</b>	<b>Camión</b>
<b>Cabeza</b>	85	84	138	217	98	109
<b>Cuello</b>	74	61	69	122	83	117
<b>Torso</b>	58	58	43	69	103	109
<b>Cadera</b>	52	58	67	101	87	127
<b>Muslo Izquierdo</b>	183	175	185	186	253	244
<b>Muslo Derecho</b>	171	163	173	160	260	247
<b>Rodilla Izquierda</b>	422	405	403	362	444	449
<b>Rodilla Derecha</b>	354	363	379	294	486	437
<b>Pantorrilla Izquierda</b>	352	364	302	377	576	332
<b>Pantorrilla Derecha</b>	299	322	256	417	443	306

Tabla 5.28 – Resultados del daño producido por cada vehículo expresado en términos de aceleración media

	TURISMO		MONOVOLUMEN		SUV		DEPORTIVO		FURGÓN		CAMIÓN	
Segmento Corporal	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto	Aceleración [g's]	Zona de contacto
<b>Cabeza</b>	99	Parabrisas	98	Parabrisas	153	Capó	303	Capó	98	Parabrisas	120	Parabrisas
<b>Cuello</b>	55	Parabrisas	57	Parabrisas	71	Capó	178	Capó	69	-	133	Parabrisas
<b>Torso</b>	59	Capó	62	Parabrisas /Capó	37	Capó	89	Capó	116	Capó	129	Capó
<b>Cadera</b>	47	Capó	66	Capó	56	Capó	106	Capó	97	Parachoques /Capó	119	Capó
<b>Muslo Izquierdo</b>	251	Parachoques /Capó	244	Parachoques /Capó	214	Parachoques	182	Parachoques /Capó	307	Parachoques	339	Parachoques
<b>Muslo derecho</b>	248	Capó	251	-	238	Parachoques	188	Parachoques /Capó	306	Parachoques	329	-
<b>Rodilla Izquierda</b>	531	Parachoques	517	Parachoques	459	Parachoques	415	Parachoques	566	Parachoques	642	Parachoques
<b>Rodilla Derecha</b>	520	Parachoques	531	Parachoques	465	Parachoques	329	-	620	Parachoques	590	Parachoques
<b>Pantorrilla Izquierda</b>	503	Parachoques	482	Parachoques	439	Parachoques	531	Parachoques	640	Parachoques	517	Parachoques
<b>Pantorrilla Derecha</b>	471	Parachoques	486	Parachoques	255	Parachoques	570	Parachoques	479	Parachoques	507	Parachoques

Tabla 5.29 – Resultados del daño producido por los distintos vehículos en el caso de la Configuración C a 50 km/h

En primer lugar, se analizan de forma independiente los resultados para cada uno de los vehículos ensayados, tras lo cual se incluyen algunas conclusiones extraídas a partir de las simulaciones realizadas en este bloque de simulaciones.

### ***Turismo***

De las cinco configuraciones de atropello consideradas, la D destaca porque en ninguno de los diez segmentos corporales analizados aparece el valor más alto de aceleración. Por el contrario, en la Configuración A se registran los valores más altos en la mitad de los segmentos corporales, concentrándose el mayor daño en la zona superior del cuerpo (cuello, torso y cadera) y en ambas rodillas. La siguiente configuración en la que se registran mayores aceleraciones es la C, con un total de tres segmentos, entre los que destacan las pantorrillas como los que mayor daño sufren. La cabeza, una de las partes del cuerpo más vulnerables, sufre en el atropello una aceleración máxima de 137 g's por el impacto contra el parabrisas en la Configuración E. Se observa como la región de las extremidades inferiores es la que sufre una mayor aceleración, ya que además de recibir el impacto directo del parachoques, se produce la elevación de las extremidades inferiores súbitamente.

Aunque existen diferencias de los valores de aceleración entre las distintas configuraciones, se puede apreciar cierta semejanza en los órdenes de magnitud de las aceleraciones.

### ***Monovolumen***

En el caso del monovolumen, únicamente son tres las configuraciones que se reparten los valores de aceleración máximos que sufren los diferentes segmentos del peatón. En la Configuración A, que representa un atropello de forma frontal, se registran los valores de aceleración máximos en el cuello, el torso y en la cadera, además de en ambas rodillas. Por otro lado, la Configuración C muestra que es la que puede causar más daño en la parte superior de las piernas, es decir, los muslos, así como en las pantorrillas. Aunque existe poca diferencia con respecto a las otras configuraciones, la E, es en este caso la que provoca una mayor aceleración en la cabeza.

Es posible diferenciar tres niveles o intensidades de aceleración, en las distintas partes del cuerpo, destacando con los valores más altos los segmentos inferiores, seguido de la aceleración provocada en la cabeza, y por último con una menor aceleración se encuentran el cuello, el torso y la cadera, con valores muy próximos entre ellos.



## **SUV**

De las distintas configuraciones simuladas, la Configuración D destaca entre las demás porque en ella se registran los valores de aceleración más altos en cinco de los diez segmentos incluidos en las tablas. El resto de valores máximos se reparten en tres configuraciones, mientras en que la Configuración A no se observa ningún valor máximo. La zona del tronco superior e inferior, torso y cadera, recibe un mayor impacto en la configuración B, además de la pantorrilla derecha. La cabeza, según los valores recogidos en la tabla, sufre la mayor aceleración cuando el atropello se produce con el peatón en un ángulo de 135º respecto al vehículo, es decir, en la Configuración E, con un registro de 213 g's.

Analizando los valores, se puede destacar que el torso es la zona del cuerpo que sufre una menor aceleración en todos los atropellos considerados, y que en el resto del cuerpo la orientación del peatón tiene una gran influencia en los valores máximos, ya que existen diferencias considerables entre los valores de un mismo segmento corporal para cada configuración.

## **Deportivo**

De los datos recogidos en la tabla correspondiente al vehículo deportivo es posible observar como no existe una configuración que destaque sobre las demás por causar la máxima aceleración, de forma que concentre el daño en alguna región específica del cuerpo. Debido al bajo perfil del vehículo y a su gran longitud del capó, no existe contacto entre el parabrisas y el cuerpo del peatón, localizándose todo el contacto de la parte superior del cuerpo en el capó. Por este motivo aparecen unos valores de aceleración muy elevados en esta zona, ya que tras la colisión, las piernas son impulsadas hacia arriba a la vez que la parte superior del cuerpo gira a gran velocidad hacia abajo, lo que provoca valores altos impactar con el vehículo. De entre las cinco configuraciones consideradas, es posible destacar la Configuración E como la que provoca mayor aceleración en cuatro de las diez partes del cuerpo, entre las que está la cabeza. Entre estos valores, destaca por encima del resto la aceleración de la pantorrilla derecha con un valor que duplica, e incluso triplica, los valores recogidos en otras configuraciones. Esta gran diferencia puede llevar a pensar que se trata de un error de cálculo del programa, aunque también hay que tener en cuenta que esta parte del cuerpo recibe el impacto del vehículo en primer lugar.

## **Furgón comercial**

Observando los valores de forma general se aprecia como la Configuración A del atropello destaca por encima del resto con seis aceleraciones máximas de las diez posibles. Además, estas zonas del cuerpo con mayor aceleración son a su vez las más elevadas del cuerpo, tratándose de los segmentos corporales que van desde la cabeza hasta ambos muslos. Siguiendo el orden descendente del cuerpo, las rodillas sufren una aceleración máxima en la Configuración B, mientras que en el caso de las

pantorrillas, los valores registrados tienen una gran dispersión en función del tipo de atropello, aunque es posible destacar el daño provocado por la Configuración E y D, en el lado izquierdo y derecho, respectivamente.

En varias de las configuraciones, los valores de aceleración de las distintas partes corporales son muy próximos, aunque del mismo modo, en otras configuraciones sí se aprecian diferencias numéricas muy elevadas respecto a otras. Los valores donde se observan mayores diferencias se centran sobre todo en la parte inferior de las piernas, o pantorrillas. Debido al corto y elevado capó, en todas las configuraciones simuladas el torso es la única parte del cuerpo que impacta totalmente en esa zona del vehículo.

### ***Camión***

La especial geometría del camión, con un frontal casi vertical hace que la Configuración A agrupe cinco de los valores máximos de aceleración, concentrados en los segmentos corporales superiores. Esto posiblemente sea debido a que al recibir el golpe de forma frontal, toda esa parte del cuerpo sufre una aceleración aproximadamente en el mismo instante de tiempo. La siguiente configuración destacable es la B, con tres valores máximos de aceleración correspondientes con uno de los muslos y ambas rodillas. A pesar de esto, existe una gran semejanza entre los valores obtenidos en esta configuración con respecto a la Configuración A. Por último, los segmentos inferiores, las pantorrillas, se ven afectados en mayor grado cuando el atropello se produce según la Configuración C.

Aunque tres de las configuraciones destacan por ser las que provocan los mayores daños, en general, no se observan diferencias demasiado importantes entre los distintos atropellos, probablemente como consecuencia de la geometría del vehículo, que restringe mucho los movimientos del peatón durante la colisión, haciendo que los valores de las aceleraciones sean cercanos.

### 5.4.3.1 Conclusiones

Tras realizar el análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones, es posible extraer las siguientes conclusiones:

- ♦ En la recopilación y en el análisis de los resultados, únicamente se han tenido en cuenta los valores de aceleración máximos, o picos, y no la duración de estos impulsos de aceleración. Se sabe que la duración de la aceleración que sufre cualquier parte del cuerpo tiene una gran importancia en el daño que sufre éste, comparable incluso con el valor máximo de la aceleración. Sin embargo, la forma en la que se han recogido los datos, de forma manual, no permite obtener valores medios de aceleración en función de la duración del impulso. A pesar de esto, los datos recogidos permiten realizar un estudio comparativo entre los diferentes vehículos y configuraciones, de forma que pueda conocerse el daño relativo que sufre el peatón ante distintos atropellos. Para poder conocer el daño real que sufriría el peatón atropellado sería necesario un proceso mucho más complejo que el llevado a cabo con estas simulaciones, en los que sería necesario un previo y completo procedimiento de validación de las simulaciones a través de pruebas de laboratorio con sistemas reales, células de carga, acelerómetros y otros sensores, con los cuales poder conocer el grado de similitud entre las simulaciones realizadas y los casos reales. El empleo de un mismo modelo de peatón en todas las simulaciones y unos modelos de vehículos con el mismo nivel de simplificación, permite que los resultados puedan ser comparados entre ellos, con lo que es posible determinar de forma aproximada el daño, y poder conocer de forma cualitativa si alguno de los vehículos simulados provoca mayor daño en el peatón al ser atropellado.
- ♦ Considerando cada vehículo por separado, es posible apreciar como, a pesar de que existe una cierta semejanza entre los resultados de las diferentes configuraciones de atropello, la orientación del peatón en el momento de sufrir el atropello tiene una gran importancia en el posible daño. Esto lleva a pensar que muy probablemente si se realizasen simulaciones modificando la posición relativa del peatón respecto al frontal del vehículo, los resultados mostrarían que esta variable también influye en gran medida en los resultados.
- ♦ Resulta difícil indicar la configuración de atropello que produce mayores daños, ya que como se puede apreciar en las tablas, cada segmento del cuerpo puede ser afectado de distinta forma dependiendo de la configuración del peatón. Sin embargo, observando las tablas de todos los vehículos en conjunto, puede apreciarse como muchos de los valores máximos de aceleración se concentran en la configuración A. Esto puede ser debido a que el peatón al ser alcanzado

de forma frontal en todo el cuerpo al mismo tiempo, la aceleración que sufre es mayor que si fuese alcanzado de forma lateral, acelerándose cada parte del cuerpo de forma progresiva. Además de ser la configuración con aceleraciones más altas, los máximos valores se concentran en la región del cuerpo del tronco y cuello principalmente, lo que puede suponer graves daños para los principales órganos internos situados en esta región corporal.

- ♦ La simulación de diferentes configuraciones de atropello entre el peatón y el vehículo ha permitido conocer que éstas son un parámetro muy importante y que pueden afectar de forma destacada al daño sufrido por un peatón, concentrando el daño en determinadas zonas del cuerpo.
- ♦ La forma geométrica de los vehículos, parece ser uno de los factores determinantes que provoca diferencias importantes en los resultados de la aceleración registrados. A pesar de que la geometría de los vehículos está muy limitada por el programa empleado, al contar todos los vehículos con el mismo nivel de detalle, los resultados pueden ser comparados entre ellos. Los modelos elegidos siguiendo determinados criterios, han permitido realizar simulaciones con vehículos de características geométricas dispares, mostrando como éste factor afecta a los valores de aceleración. Por este motivo, se puede afirmar que el empleo de otros vehículos diferentes, de las mismas categorías, llevaría a resultados distintos, aunque también es de esperar que los valores de aceleración siguiesen esta misma tendencia, destacando por encima del resto el mismo tipo de vehículo. A pesar de que en las simulaciones se han empleado modelos específicos de vehículos, lo más importante de estos es que pertenecen a categorías diferentes y por tanto pueden emplearse para obtener conclusiones acerca de la gravedad del atropello, en función del vehículo implicado.
- ♦ Aunque la configuración y el tipo de vehículo condiciona los valores de aceleración registrados, es posible identificar en general tres niveles de aceleración que afectan a otras tantas zonas del cuerpo. En primer lugar, con los valores de aceleración mayor, se encuentran las rodillas y zona inferior de las piernas o pantorrillas. Estas zonas del cuerpo son las que reciben el impacto directo del parachoques de los vehículos y son impulsadas hacia arriba de forma muy rápida y con una gran fuerza, capaz de elevar el resto del cuerpo y hacerlo girar. En un valor intermedio de aceleración se sitúa la zona superior de las piernas, o muslos, ya que el impacto con el vehículo no es tan directo y parte de la aceleración es provocada por el impulso suministrado a la parte inferior de las piernas. Por último, con los niveles de aceleración más bajos, aunque no en todos los casos es así, se encuentran las regiones del cuerpo comprendidas desde la cadera a la cabeza. La colisión se localiza en el

parabrisas, capó o parte superior del parachoques, haciendo que la aceleración sea de menor intensidad ya que el cuerpo en el impacto sufre una variación de velocidad más progresiva.

- ♦ La elección de la aceleración como el parámetro principal tenido en cuenta en los resultados de las simulaciones, se basa en la relación directa que existe entre aceleración y daño. En general, a mayor aceleración sufrida por una parte del cuerpo, mayor es el daño que puede producirse. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la relación entre el daño y aceleración es intrínseca para cada parte o región del cuerpo. Cada una cuanta con un nivel de tolerancia a las aceleraciones, y por tanto no pueden ser comparados los valores de aceleración entre distintas partes del cuerpo. Así, una zona ósea como la cadera no puede compararse con la cabeza, puesto que el nivel de daño en cada caso está relacionado con un valor máximo de aceleración, y también del tiempo de ésta. Por esta razón, los valores recogidos en las tablas no son comparados entre distintas partes del cuerpo.
- ♦ A pesar de que las fuerzas de contacto se han incluido en el Anexo II al final de este documento para poder ser consultadas, su utilidad finalmente se ha visto reducida debido a distintas razones. Las fuerzas de contacto registradas en las diferentes configuraciones para un mismo vehículo, muestran una elevada disparidad en los valores que resulta difícil explicar teniendo en cuenta que se trata de un mismo vehículo y el atropello se produce a la misma velocidad. Una de las razones posibles reside en la influencia de la geometría local del frontal del vehículo, que produce valores en los cálculos excesivamente elevados. Debido a esto no es posible destacar una clara tendencia en los resultados basados en las fuerzas de contacto. Además, muchos de los contactos registrados tienen una gran componente de los propios choques entre los cuerpos del modelo peatón multicuerpo, lo que dificulta la diferenciación de los contactos con el vehículo o el suelo durante el análisis. Aún así, aunque las fuerzas de contacto han mostrado que ciertos valores no pueden ser considerados como válidos, sí han servido para comparar los contactos del peatón con el vehículo y el suelo. Según los valores observados, el impacto contra el suelo después de la colisión y el posterior vuelo, no puede ser despreciado, ya que en muchos casos la fuerza de contacto sobre algunas de las partes del cuerpo son del mismo orden de magnitud, e incluso mayores, a las que se producen en el impacto con el vehículo. Esto mismo se puede observar en el caso de la aceleración.

- ♦ Del análisis de la Tabla 5.28, donde se recogen los valores medios de las aceleraciones máximas, pueden extraerse las siguientes conclusiones:
  - Considerando el número de segmentos corporales que soportan las máximas aceleraciones medias, y las segundas aceleraciones más altas, sería el furgón comercial el vehículo que más daño provocaría cuando se produce un atropello a 50 km/h, seguido por el camión, ambos con 7.
  - Es destacable que la mayor aceleración media en la cabeza y el cuello se dé en el caso del atropello con un deportivo, como puede verse en el Gráfico 5.6. De nuevo, parece ser que la altura del capó unido al bajo punto de impacto del parachoques, provoca estos valores tan altos.

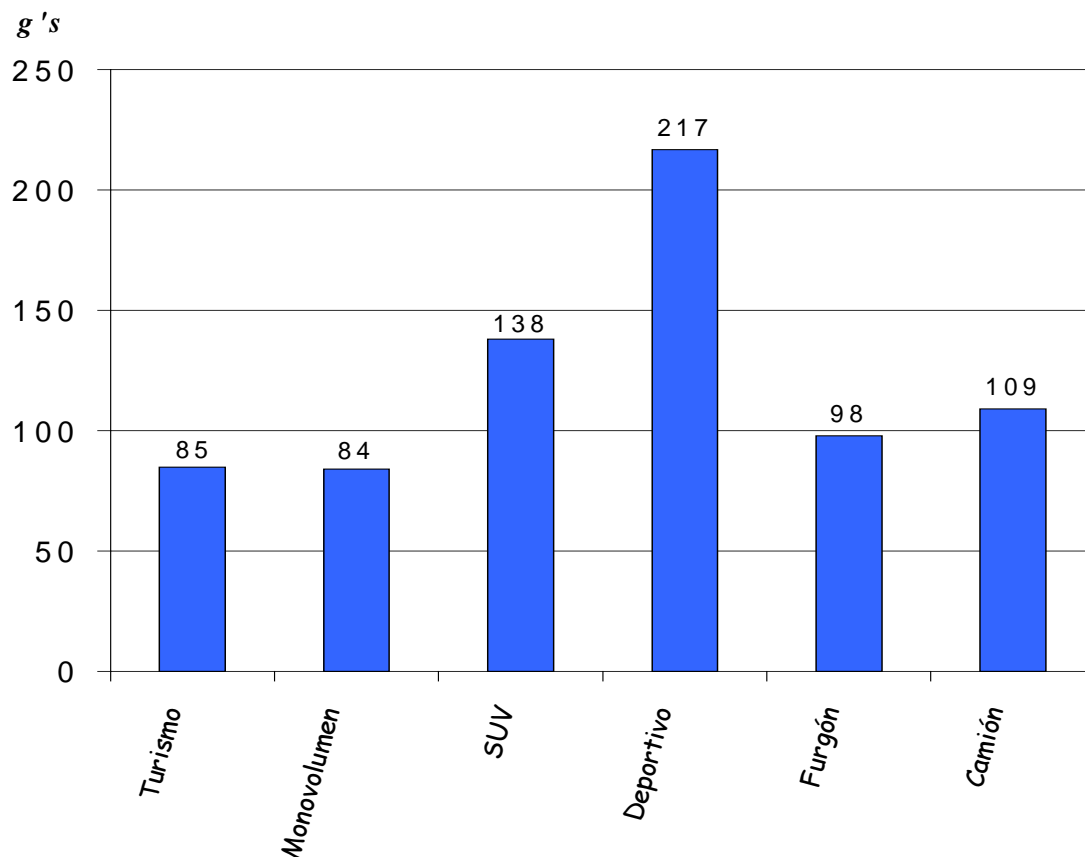


Gráfico 5.6 – Daño provocado en la cabeza del peatón por cada uno de los vehículos

- ♦ Del análisis de la Tabla 5.29, donde se recogen los valores para la Configuración C pueden extraerse las siguientes conclusiones:
  - Al analizar el daño relativo generado en la Configuración C destaca que los valores máximos producidos en cada segmento corporal aparecen únicamente en tres de los seis vehículos, siendo estos: el deportivo, el furgón y el camión. Cuando se considera el segundo mayor valor de aceleración, se vuelve a dar esta circunstancia, aunque unos de los valores aparecen en otro de los vehículos, el SUV. Sin embargo, a pesar de este dato, puede considerarse que los tres vehículos mencionados anteriormente son los que mayor daño causarían en caso de atropello.
  - Los valores registrados para la aceleración de la cabeza y el cuello en el caso del deportivo, destacan por encima del resto. La posible explicación reside en que la parte superior del cuerpo durante el giro, adquiere una gran velocidad, mayor que en el resto de vehículos debido a que el contacto con el capó se produce más tarde por la baja altura de éste, lo que provoca un impacto de la mayor aceleración.
  - El furgón provoca los valores más altos de aceleración en la rodilla derecha y la pantorrilla izquierda. Además de estos valores máximos, este vehículo registra cuatro de los segundos máximos valores en torso, rodilla izquierda y en ambos muslos.
  - En el caso del camión, aparecen valores máximos en: torso, cadera, ambos muslos y rodilla izquierda. La concentración de las cifras más altas de aceleración en esta región del cuerpo responde a la geometría tan vertical del camión que hace que toda esa zona reciba el impacto directo. Junto con estos valores, en otros tres segmentos corporales aparecen segundos valores máximos, lo que supone que en la configuración considerada el camión provoca los máximos valores relativos.
- ♦ La geometría de los frontales parece ser el factor clave para determinar las zonas del cuerpo que se ven más afectadas por la aceleración. De este modo, los perfiles con un capó largo de baja altura, generan aceleraciones mayores en la zona más alta del cuerpo como la cabeza y el cuello. Los frontales verticales de gran altura, sin capó inclinado, como el de los camiones provocan la localización del mayor daño en la región intermedia del cuerpo, desde el cuello hasta las rodillas. La geometría de vehículos más comunes, con los planos del parabrisas, del capó y del parachoques bien diferenciados, formando distintos ángulos, ofrecen una frontal más suavizado que favorece que el cuerpo del

peatón impacte de forma progresiva en distintas zonas, provocando menores aceleraciones en general.

- ♦ Las diferencias observadas entre los distintos valores, en ocasiones mínimas, exigen clasificar con cautela el nivel de daño que cada vehículo provocaría en caso de atropello, ya que es posible que al emplear otro vehículo o modelo de peatón, los valores pueden ser distintos, llevando a conclusiones diferentes.
- ♦ Además de las simulaciones realizadas, se han llevado a cabo diversas pruebas modificando otros parámetros de las simulaciones para poder evaluar de mejor forma la influencia de estos en los resultados de la aceleración. Para ello se han variados los valores de masa del vehículo, velocidad, rigidez, y se ha variado la geometría del vehículo de forma extrema. Las pruebas modificando la masa de uno de los vehículos han mostrado como, aunque aparecen diferencias, éstas son mínimas y no producen cambios destacables en los resultados de las simulaciones. Cuando es la rigidez de la carrocería lo que se modifica, los resultados son similares en todos los casos. Por el contrario, se ha observado como la influencia en la velocidad del atropello y la geometría del vehículo son los factores más influyentes en los resultados. Como es de esperar, la mayor velocidad del vehículo produce valores de aceleración mayores, observándose que la relación no es lineal. La geometría también influye en gran medida en los resultados, tanto en los valores máximos como en los momentos en los que se producen. Se han comprobado la geometría utilizada en las simulaciones, la geometría por defecto y otras geometrías con distintas alturas del capó y el parachoques. Claramente se observan curvas de comportamiento muy dispares dependiendo del caso, destacando por encima del resto, el caso del capó bajo, que produce niveles de aceleración en la cabeza muy superiores a los registrados en el resto de geometrías.
- ♦ Para poder llegar a una conclusión definitiva sobre qué vehículo causa más daño en el caso de un atropello a 50 km/h, sería necesario considerar un criterio que tuviese en cuenta los valores de aceleración límite para cada segmento corporal, ya que el número de zonas afectadas por una aceleración máxima no siempre sería el adecuado. Tampoco podría estimarse una media de aceleración para cada vehículo en el que se tengan en cuenta los valores de todos los segmentos, porque como ya se ha dicho, estos valores no pueden compararse. Un mismo vehículo puede provocar valores de aceleración máximos en varios segmentos corporales, pero sin embargo, es posible que la gravedad de las lesiones globales sea inferior al de otro vehículo que causa la máxima aceleración en una sola parte del cuerpo.



## 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones más importantes que se pueden extraer de la finalización del presente Proyecto:

- ♦ Se ha realizado una recopilación y ordenación de diferente información relacionada con los atropellos de peatones, con la cual poder tener un mayor conocimiento de este tipo de accidentes. De esta información se puede destacar que los atropellos de peatones actualmente siguen siendo un grave problema para la sociedad debido al gran número de víctimas, que requiere una atención especial por parte de toda la sociedad para continuar con la disminución del número de afectados cada año.
- ♦ Se han repasado los distintos ensayos de atropello que se realizan en la actualidad, indicando las diferentes normas que los rigen. Se ha comprobado como existen dos métodos de ensayos principalmente, cuya diferencia se centra en si se considera únicamente unas determinadas partes del cuerpo del peatón o éste al completo. El primer método se basa en subsistemas o impactadores, mientras que el segundo método se basa en la mayoría de los casos en los llamados crash test dummies, o maniquíes de pruebas de choque. En los dos casos se han descrito detalladamente ambos sistemas, haciendo mayor hincapié en los crash test dummies por estar relacionados con el método de ensayo empleado en las simulaciones realizadas en este Proyecto.
- ♦ Se ha destacado la importancia que tiene en la actualidad la utilización de la informática como herramienta de trabajo en la industria, en general, y también en la realización de los ensayos de atropello. Se han descrito alguno de los programas de simulación más empleados en las pruebas de atropello, haciéndolo con mayor detalle en el caso del programa PC-CRASH, por ser el utilizado en el presente Proyecto.
- ♦ Se han indicado los principales pasos a seguir cuando se pretende realizar la simulación de un atropello mediante el empleo de un programa informático. Uno de los pasos más importantes es el modelización del peatón, empleándose en la mayoría de los casos los llamados multicuerpo o multibody, que se basan en la segmentación del cuerpo humano. Los datos de partida para la generación de estos

multicuerpo suelen obtenerse de tablas antropométricas que recogen la información detallada y procesada de diferentes magnitudes corporales, pertenecientes a un determinado grupo de individuos.

- ◆ Empleando el programa PC-CRASH se han realizado un amplio número de simulaciones, abarcando diferentes situaciones en las que puede producirse un atropello. Se han realizado simulaciones con distintos vehículos, a diferentes velocidades y situando al peatón en posiciones variadas, con el fin de poder conocer la influencia en los resultados de cada uno de estos factores. Además de las simulaciones finalmente consideradas, en las que se reproduce un accidente típico con una secuencia de frenada, se han realizado otras en las que el vehículo no realiza la frenada y que pueden ser utilizadas en trabajos posteriores. Todas ellas se encuentran disponibles en los discos adjuntos a este Proyecto.
- ◆ Los resultados de las simulaciones han mostrado que las tipologías de atropello teóricas no siempre son posibles en determinados vehículos, y que el factor más determinante es la geometría lateral del frontal del vehículo. Aunque hay que tener en cuenta que la velocidad del vehículo en el momento del atropello y la posición del peatón son también importantes para que pueda darse un tipo u otro de atropello. En los casos específicos en los que se ha empleado el camión, únicamente se han observado dos de las cinco tipologías de atropello, lo que demuestra que este tipo de geometría de los vehículos requiere una atención especial.
- ◆ Gracias al empleo de varios vehículos, pertenecientes a categorías diferentes, se ha podido conocer, analizando los resultados de las simulaciones, las zonas del cuerpo del peatón que se ven más afectadas en función del vehículo implicado. Considerando distintos atropellos, a una misma velocidad, se ha observado como los vehículos con las geometrías más dispares respecto del resto son los que concentran el mayor daño en el cuerpo del peatón. El vehículo deportivo causa el mayor daño en la parte superior del cuerpo, cabeza y cuello, debido a la baja altura de su capó. El camión concentra el mayor daño en la parte central del peatón, es decir, tronco, cadera y muslos, debido a que el impacto se produce de forma directa sobre esa zona. Por último, el furgón comercial registra el mayor daño en las extremidades inferiores, aunque el resto del cuerpo también sufre un gran daño, debido a una peculiar geometría compuesta por un parabrisas de baja altura, un capó corto y un parabrisas en un elevado ángulo.

En resumen, con este Proyecto Fin de Carrera se han tratado los diferentes aspectos referentes a los atropellos de peatones, destacando la importancia que tienen los ensayos de atropello para la mejora en el conocimiento de este tipo de accidentes viales. Además, se ha comprobado como la simulación de los atropellos, empleando un modelo de peatón validado, como el utilizado en este Proyecto, permite conocer los movimientos del peatón durante y tras el atropello, así como las zonas de su cuerpo más afectadas por el impacto del vehículo.

## 6.2 TRABAJOS FUTUROS

A partir de la realización de este Proyecto Fin de Carrera es posible indicar algunas ideas que pueden dar lugar a las siguientes líneas de trabajo:

- ♦ La parte experimental llevada a cabo en este Proyecto se puede seguir desarrollando de la siguiente forma:
  - Utilizar las simulaciones ya realizadas sobre los atropellos sin secuencia de frenada, completando los casos necesarios, para volver a realizar un análisis similar al de este Proyecto, de forma que puedan compararse los resultados en ambos casos, obteniendo nuevas conclusiones.
  - Continuar con las mismas simulaciones empleando otros vehículos diferentes, aunque de las mismas categorías, para poder tener una base de resultados mayor, y de esta forma poder comprobar si existe una clara tendencia entre los vehículos de un mismo tipo.
  - Simular otros atropellos con posiciones relativas diferentes entre el vehículo y el peatón.
  - Realizar las simulaciones empleadas en la determinación del daño a distintas velocidades, a partir de las cuales poder conocer la influencia que tiene la velocidad en el daño provocado en el cuerpo del peatón.
  - Realizar las mismas simulaciones, tanto para determinar la tipología del atropello como el daño, modificando el modelo de peatón. Estas modificaciones pueden centrarse en la configuración de las articulaciones del modelo, con las cuales cambiar su comportamiento tras el impacto, o bien, modificar los valores del modelo para conseguir peatones diferentes. En este sentido, pueden realizarse diferentes modelos de peatón considerando diferentes alturas y pesos, obteniendo de esta forma peatones que representen a diferentes individuos, como son niños o adultos de distinta complejidad.
- ♦ Los resultados obtenidos para los vehículos con una geometría “más vertical”, como son los furgones comerciales y los camiones, muestran que son vehículos que requieren estudios particularizados, ya que no se ajustan por completo al comportamiento mostrado por el resto de vehículos, de geometrías con mayor similitud. Por esta razón, pueden desarrollarse diferentes estudios que se centren en analizar la interacción de este tipo de vehículos con los peatones. La utilidad de estos estudios específicos puede centrarse en la investigación de accidentes de

tráfico, al conocer mejor la localización del daño en el cuerpo de los peatones, o la trayectoria del viandante tras el atropello; o también, en el desarrollo de medidas de seguridad en caso de atropello especialmente diseñadas para estos vehículos.

- ♦ Las simulaciones realizadas de los diferentes atropellos, o cualquier otra simulación que se realice, pueden tomarse como referencia para el diseño y desarrollo de un maniquí antropomórfico y antropométrico, basado en multicuerpos, para la simulación experimental de ensayos de atropellos en laboratorio. El modelo multicuerpo empleado en las simulaciones está basado en multicuerpos de tipo elipsoides, que pueden ser totalmente configurados, ayudando de esta forma en el desarrollo del maniquí. En la fase de diseño del maniquí pueden emplearse las simulaciones para ver como se comportaría el maniquí en los ensayos reales, o una vez realizado el prototipo, comparar los resultados medidos en el laboratorio con los valores obtenidos en las simulaciones.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

### 7.1 LIBROS Y ARTÍCULOS

[I]. Anderson, RWG; Streeter, LD; Ponte, G; McLean, AJ: *Pedestrian Reconstruction Using Multibody MADYMO Simulation and the POLAR II Dummy: A Comparison of Head Kinematics*. Centre for Automotive Safety Research. University of Adelaide. Paper number 07-0273. AUSTRALIA

[II]. Ashton, S.J. and Mackay, G.M.: *Benefits from Changes in Vehicle Exterior Design - Field Accident and Experimental Work in Europe*. SAE Technical paper # 830626

[III]. Barrios, José Manuel: *El accidente de tráfico. Definición de medidas para la mejora de la seguridad vial*. Departamento de Seguridad Pasiva de Applus+ADIADA. España.

[IV]. Campón Domínguez, José Andrés; San Román García, José Luis; Díaz López, Vicente; Sanz Sánchez, Susana: *La Reconstrucción de Accidentes: El atropello de Peatones (1ª Parte)*. Comisión territorial de Madrid de STA. España.

[V]. Cesari, D., C. Cavallero, J. Farisse, and J. Bonnoit, *Effects of Crash Conditions on Pedestrian Leg Kinematics and Injuries Based on Cadaver and Dummy Tests*. 29th Annual Proceedings, American Association for Automotive Medicine. (1985)

[VI]. Crandall, Jeff; Wiley, K.; Longhitano, Doug; Akiyama, A.: *Development of Performance Specifications for a Pedestrian Research Dummy*. SAE Pedestrian Dummy Task Group. Paper 05-0389.

[VII]. Depriester, J-P.; Perrin, C.; Serre, T.; Chalandon, S.: *Comparison of Several Methods for Real Pedestrian Accident Reconstruction*. Paper Number 05-0333. France.

[VIII]. Dhillon, Kyle: *Simulation of Potential Injuries Due to Fall at the Aircraft Entry Door*. Wichita State University. EEUU. (2007)

[IX]. Díaz López, Vicente; San Román García, José Luis; Campón Domínguez, José Andrés; Sanz Sánchez, Susana: *La Reconstrucción de Accidentes: El atropello de Peatones (2ª Parte)*. Comisión territorial de Madrid de STA. España.

[X]. Jürgens, H. W.: *International Data of Anthropometry*. International Labour Office. (1990)

[XI]. Kerrigan, Jason R.; Murphy, Drew B.; Kam, Check Y.; Bose, Dipian; Crandall, Jeff R.: *Kinematic Corridors for PMHS Tested in Full-scale Pedestrian Impact Tests*. University of Virginia Center for Applied Biomechanics. EEUU. Paper number 05-0394

[XII]. Mizumo, Yoshiyuki: *Summary of IHRA Pedestrian Safety WG Activities (2003) – Proposed Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Offered by Passenger Cars*. Japan Automobile Standards Internationalization Center (JASIC). Paper number 580. Japan. (2003)

[XIII]. Mizumo, Yoshiyuki: *Summary of IHRA Pedestrian Safety WG Activities (2005) – Proposed Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Afforded by Passenger Cars*. Japan Automobile Standards Internationalization Center (JASIC). Paper number 05-0138. Japan. (2005)

[XIV]. Moser, A.; Steffan, H.; Kasanický, G.: *The Pedestrian Model in PC-Crash – The Introduction of a Multi Body System and its Validation*. SAE Technical Paper Series 1999-01-0445. Michigan, EEUU. (1999)

[XV]. Naga, Soumya: *An Efficient Algorithm for Clinical Mass Center Location of Human Body*. University of Cincinnati. EEUU.(2005)

[XVI]. Prizt, HB: *Investigación experimental de los impactos de las cabezas de los peatones en el capó y en la aleta de los vehículos*. SAE Num. 830055. Warrendale, EEUU. (1983)

[XVII]. Rodić, Aleksandar D.: *Identification of Anthropomorphic Parameters – Kinematical and Dynamic Body-Segment Characteristics*

[XVIII]. San Román García, José Luis; Campón Domínguez, José Andrés; Díaz López, Vicente; Sanz Sánchez, Susana: *La Reconstrucción de Accidentes: El atropello de Peatones (3ª Parte)*. Comisión territorial de Madrid de STA. España.

[XIX]. Scherf, O.: *Development and Performances of Contact Sensors for Active Pedestrian Protection Systems*. Siemens Restraint Systems GmbH. Paper number 05-0021. Germany.

[XX]. Stammnen J.A.; Saul R. A.; Ko, B.: *Pedestrian Head Impact Testing and PCDS Reconstructions*. Paper 326. EEUU.

[XXI]. Steffan, H.; Moser, A.; Hoschopf, H.; Kasanický, G.: *Validation of the PC-CRASH Pedestrian Model*. Society of Automotive Engineers, Inc. 2000-01-0847. (2000)

- [XXII]. Sung-won Ko, Brian: *Demographic Analysis and Reconstruction of Selected Cases from the Pedestrian Crash Data Study*. Ohio State University. Department of Mechanical Engineering. EEUU. (2001)
- [XXIII]. Tinard, V.; Bourdet, N.; Deck, C.; Wilinger, R.: *Active Pedestrian Head Protection Against Windscreen*. Biomechanical Systems Transport and Safety.07-0449. Intitut de Mécanique des Fluides et des Solides. France.
- [XXIV]. van der Zweep, C. D.; Kellendonk, G.; Leneman, F.: *Car Numerical Models for Use in Truck Impact Modelling*. TNO Automotive. Project number: GRD2-2001-50083. (2005)
- [XXV]. van Hoof, Jack: *MADYMO Dummy Models. Latest Update*. LS-DYNA Anwenderforum, Ulm 2006. Alemania. (2006)
- [XXVI]. Winter, D.A.: *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. J. Wiley & Sons Inc. (1990)
- [XXVII]. Xavier Aguado, X.: *Biomecánica fuera y dentro del laboratorio*. Universidad de León. España. (1997)
- [XXVIII]. Yang, Jikuang: *Review of injury Biomechanics in car-pedestrian collisions*. Crash Safety Division Machine and Vehicle Systems. SE-412 96. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden. (2002)

## 7.2 OTRAS FUENTES

- [1]. *Series Estadísticas sobre Accidentes y Víctimas I*. Dirección General de Tráfico (DGT). España. (2007)
- [2]. *El RACC y el Ayuntamiento de Madrid presentan la campaña «¡Atención! Todos somos peatones»*. Real Automóvil Club de Cataluña (RACC). España. (2008)
- [3]. *La seguridad vial no es accidental*. Departamento de Prevención de los Traumatismos y la Violencia. Organización Mundial de la Salud. (2004)
- [4]. *International Road Traffic and Accident Database (IRTAD)*. [www.irtad.com](http://www.irtad.com). (Última consulta: marzo 2009)
- [5]. *Informe Europeo sobre atropellos de peatones*. Real Automóvil Club de España (RACE). España.(2008)



- [6]. *Dirección General de Tráfico (DGT)* [www.dgt.es](http://www.dgt.es). (Última consulta: marzo 2009)
- [7]. *Informe Anual de Siniestralidad. Año 2007*. Dirección General de Tráfico (DGT). España. (2008)
- [8]. *Las principales cifras de Siniestralidad Vial. España 2006*. Dirección General de Tráfico (DGT). Observatorio Nacional de Seguridad Vial. España
- [9]. *Seguridad Vial 2004 / Road Safety 2004*. Dirección General de Tráfico (DGT). España
- [10]. Association for the Advancement of Automotive Medicine (AAAM). [www.aaam.org](http://www.aaam.org). (Última consulta: marzo 2009)
- [11]. San Román García, José Luis: *Resistencia del Cuerpo Humano a Impactos y Deceleraciones*. Universidad Carlos III de Madrid – Área de Ingeniería Mecánica. España. (2004)
- [12]. Real Academia Española (RAE). [www.rae.es](http://www.rae.es). (Última consulta: marzo 2009)
- [13]. Martínez Ramos, Tatiana M.: *Tema 89 – Temario Específico ESTT-OEP 2005*. España. (2004)
- [14]. Ruiz de Peralta Valero, Gracia: *Tema 37 – Temario Específico ESTT-OEP 2005*. España. (2004)
- [15]. *Ficha 5.5: Intersecciones y Pasos de Peatones*. Instrucción de Vía Pública. Ayuntamiento de Madrid. España. (2000)
- [16]. *Informe RACE. Estudio sobre velocidades en zona urbana*. Real Automóvil Club de España (RACE). España.(2007)
- [17]. Real Decreto Legislativo 339/1990
- [18]. Diario La voz de Galicia (20/11/2008). España. (2008)
- [19]. Lexus España (Toyota España S.L.U.). [www.mundolexus.com](http://www.mundolexus.com). (Última consulta: marzo 2009)
- [20]. Autoliv, Inc. [www.autoliv.com](http://www.autoliv.com). (Última consulta: marzo 2009)

- [21]. Nissan Motor Company. [www.nissan-global.com](http://www.nissan-global.com). (Última consulta: marzo 2009)
- [22]. Honda Motor Co., Ltd. <http://world.honda.com>. (Última consulta: marzo 2009)
- [23]. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). [www.inta.es](http://www.inta.es). (Última consulta: marzo 2009)
- [24]. Applus+ IDIADA. [www.idiada.es](http://www.idiada.es). (Última consulta: marzo 2009)
- [25]. *Directiva Europea 2007/46/CE*. (2007)
- [26]. *Directiva Europea 96/27/CE*. (1996)
- [27]. *Directiva Europea 96/79/CE*. (1996)
- [28]. *Directiva Europea 1999/98/CE*. (1999)
- [29]. *Directiva Europea 2003/102/CE*. (2003)
- [30]. *Directiva Europea 2005/66/CE*. (2005)
- [31]. *Propuesta de REGLAMENTO DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO relativo a la protección de los peatones y otros usuarios vulnerables de la vía pública*. 2007/0201 (COD). (2007)
- [32]. *Prescripciones Técnicas de la Directiva Europea 2003/102/CE*. (2004/90/CE) (2003)
- [33]. European Enhanced Vehicle-safety Committee (EEVC). [www.eevec.org](http://www.eevec.org). (Última consulta: marzo 2009)
- [34]. *Improved Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Afforded by Passenger Cars*. EEVC Working Group 17.(2002)
- [35]. Konosu, A.; Tanahashi, M.: *Development of a Biofidelic Flexible Pedestrian Legform Impactor (Flex-PLI 2003)*
- [36]. Transport Research Laboratory (TRL). [www.trl.co.uk](http://www.trl.co.uk). (Última consulta: marzo 2009)
- [37]. Sung-won Ko, Brian: *Demographic Analysis and Reconstruction of Selected Cases from the Pedestrian Crash Data Study*. SAE 2002 World Congress. EEUU. (2002)

- [38]. Rasico, Jim; van Ratigen, Michiel; Kulwichi, Mike: *Overview of Standards and Potential for New Regulation*. Fist Technology Safety Systems, Inc. (FTSS). (2007)
- [39]. *History of Anthropomorphic Test Devices*. Denton ATD, Inc. EEUU
- [40]. Crash Test Dummy. [http://en.wikipedia.org/wiki/Crash\\_test\\_dummy](http://en.wikipedia.org/wiki/Crash_test_dummy). (Última consulta: marzo 2009)
- [41]. *Maniquíes Casi Humanos*. Revista Tráfico. (Septiembre-Octubre 1998). España. (1998)
- [42]. First Technology Safety Systems (FTSS). [www.ftss.com](http://www.ftss.com). (Última consulta: marzo 2009)
- [43]. GESAC, Inc. [www.gesacinc.com](http://www.gesacinc.com). (Última consulta: marzo 2009)
- [44]. Denton ATD, Inc. [www.dentonatd.com](http://www.dentonatd.com). (Última consulta: marzo 2009)
- [45]. Pfoutz, Yvonne: *Turning Dummies into a Smart Business*. Quad-State Business Journal. (Jul 2007)
- [46]. General Motors. [www.gm.com](http://www.gm.com). (Última consulta: marzo 2009)
- [47]. European New Car Assessment Programme (EuroNCAP). [www.euroncap.com](http://www.euroncap.com). (Última consulta: marzo 2009)
- [48]. Insurance Institute for Highway Safety (IIHS). [www.hwysafety.org](http://www.hwysafety.org). (Última consulta: marzo 2009)
- [49]. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). [www.nhtsa.dot.gov](http://www.nhtsa.dot.gov). (Última consulta: marzo 2009)
- [50]. *Advanced crash Dummy Research for Injury Assessment in Frontal Test Conditions (ADRIA)*. TNO Crash Safety Research Centre (TNO). PL96-1074. (2000)
- [51]. Kelly, James R.: *BioRID-Iic Rear Impact Crash Test Dummy*. Robert A. Denton, Inc. EEUU.
- [52]. *Honda Develops a 2nd Generation Crash Test Pedestrian Dummy With Injury-Level Measurement Capability*. Honda Motor Co., Ltd. (2000)

- [53]. *El Habitáculo de Seguridad*. Instituto de Investigación sobre Reparación de Vehículos – Centro Zaragoza. (2000)
- [54]. Muñoz Abella, M<sup>a</sup> Belén: *Análisis del Comportamiento del Cuerpo Humano en Colisiones*. Universidad Carlos III de Madrid - Área de Ingeniería Mecánica. (2004)
- [55]. *Assessment Protocol and Biomechanical Limits, version 4.2*. European New Car Assessment Programme (EuroNCAP). (2008)
- [56]. *Pedestrian Testing Protocol, version 4.2*. European New Car Assessment Programme (EuroNCAP). (2008)
- [57]. *Crash Test 2006 Results*. Australasian New Car Assessment Program (ANCAP).
- [58]. AMR Engineering Solutions. [www.amr.eng.br](http://www.amr.eng.br). (Última consulta: marzo 2009)
- [59]. *PC-CRASH. Technical Manual, version 6.2*. Linz, Austria. (2001)
- [60]. *PC-CRASH. Operating Manual, version 8.1*. Linz, Austria. (2007)
- [61]. Thumbprint Solutions Inc. [www.thumbprintsolutions.com](http://www.thumbprintsolutions.com). (Última consulta: marzo 2009)
- [62]. TASS – TNO Automotive Safety Solutions. [www.tass-safe.com](http://www.tass-safe.com). (Última consulta: marzo 2009)
- [63]. *Biofidelic Design Tools for Impact and Comfort*. MADYMO Humans Models. TASS, TNO Automotive Safety Solutions. Delft, The Netherlands.
- [64]. Livermore Software Technology Corp. [www.lstc.com](http://www.lstc.com). (Última consulta: marzo 2009)
- [65]. Aertia Software. [www.aertia.com](http://www.aertia.com). (Última consulta: marzo 2009)
- [66]. DYNAmore GmbH. [www.dynamore.de](http://www.dynamore.de). (Última consulta: marzo 2009)
- [67]. ESI Group. [www.esi-group.com](http://www.esi-group.com). (Última consulta: marzo 2009)
- [68]. Dr. Steffan Datentechnik (DSD. [www.dsd.at](http://www.dsd.at). (Última consulta: 2009)
- [69]. *Revista del Automóvil y el Turismo AUTOCEA* (Noviembre 2006). Págs 14-15. España. (2006)

- [70]. Air Force Research Laboratory (AFRL) [www.biodyn.wpafb.af.mil/mainmenu.htm](http://www.biodyn.wpafb.af.mil/mainmenu.htm). (Última consulta: noviembre 2008). [www.wpafb.af.mil/AFRL](http://www.wpafb.af.mil/AFRL). (Última consulta: marzo 2009)
- [71]. Asociación Nacional de Importadores de Automóviles, Camiones, Autobuses y Motocicletas (ANIACAM). [www.aniacam.com](http://www.aniacam.com). (Última consulta: marzo 2009)
- [72]. Automóviles Citroën España, S.A.. [www.citroen.es](http://www.citroen.es). (Última consulta: marzo 2009)
- [73]. Renault España Comercial, S.A. (RECSA). [www.renault.es](http://www.renault.es). (Última consulta: marzo 2009)
- [74]. BMW Ibérica, S.A.. [www.bmw.es](http://www.bmw.es). (Última consulta: marzo 2009)
- [75]. Mercedes-Benz España, S.A.. [www.mercedes-benz.es](http://www.mercedes-benz.es). (Última consulta: marzo 2009)
- [76]. Fiat Group Automobiles Spain, S.A. [www.fiat.es](http://www.fiat.es). (Última consulta: marzo 2009)
- [77]. Iveco España, S.L.. [www.iveco.es](http://www.iveco.es). (Última consulta: marzo 2009)

## 8. ANEXOS

### 8.1 ANEXO I

En este primer anexo se incluyen las tablas de resultados de las tipologías de atropello tratadas en el Capítulo 5.3.

#### *Tipologías de Atropello para un Turismo medio*

##### **CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 1**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	30 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	40 km/h
Salto mortal (somersault)	40 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.48 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	3 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	14.2 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m

**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 2**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	30 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	-
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.8 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.28 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	3.8 m
Distancia recorrida en dirección transversal	2.4 m

**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 3**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	30 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	40 km/h
Salto mortal (somersault)	40 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.37 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	2.53 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	13.7 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.8 m

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 4

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	30 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.37 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	2.27 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	12.9 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 5

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	-
Proyección hacia delante (forward projection)	-
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	-
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	Despreciable
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	Despreciable
Distancia recorrida en dirección longitudinal	Despreciable
Distancia recorrida en dirección transversal	1.2 m



**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 6**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	30 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	40 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	40 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.185 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.96 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	10.35 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0.6 m

**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 7**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	30 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	40 km/h
Salto mortal (somersault)	40 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.33 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	2.22 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	12.36 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.85 m

**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 8**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	30 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	40 km/h
Salto mortal (somersault)	40 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.97 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.45 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	7 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.66 m

## Tipologías de Atropello para un Monovolumen

### **CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 1**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	20 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	30 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.68 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	3.82 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	20 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m

### **CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 2**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	30 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.9 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	6.6 m
Distancia recorrida en dirección transversal	2.75 m

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 3

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	20 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	20 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	40 km/h
Salto mortal (somersault)	40 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.33 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	2.66 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	14.28 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.45 m

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 4

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	20 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	40 km/h
Salto mortal (somersault)	40 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.47 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	2.92 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	16.7 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 5

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	50 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	20 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	60 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.67 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.2 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	2.51 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.82 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 6

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	20 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.14 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	13.9 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	7 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0.6 m

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 7

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	20 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	30 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	40 km/h
Salto mortal (somersault)	40 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.53 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	3 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	16.8 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.7 m

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 8

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	40 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	30 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	40 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.2 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	2 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	14.25 m
Distancia recorrida en dirección transversal	2 m

## Tipologías de Atropello para un SUV

### **CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 1**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	20 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	40 km/h
Salto mortal (somersault)	40 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.37 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	2.75 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	13.85 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m

### **CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 2**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	30 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	40 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.64 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	6.3 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.58 m

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 3

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	10-80 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.2 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.96 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	9.1 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.85 m

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 4

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	20 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	10-80 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.17 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.93 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	12.7 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m



**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 5**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	10-80 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	20 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	-
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.67 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	Despreciable
Distancia recorrida en dirección longitudinal	3.1 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.7 m

**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 6**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	10-80 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	60 km/h
Salto mortal (somersault)	40 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.05 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.68 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	11 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0.3 m

**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 7**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	10-80 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	50 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.18 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.88 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	11.7 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.4 m

**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 8**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	10-80 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	60 km/h
Salto mortal (somersault)	40 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.9 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.5 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	8.55 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.6 m

## Tipologías de Atropello para un Deportivo

### **CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 1**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	40 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	70 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.5 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	12.5 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m

### **CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 2**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	40 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	20 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	-
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.6 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	Despreciable
Distancia recorrida en dirección longitudinal	4.75 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.6 m

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 3

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	30 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	20 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	60 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.1 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.2 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	12 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0.6 m

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 4

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	40 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.1 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.7 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	11.5 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m

**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 5**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	-
Proyección hacia delante (forward projection)	-
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	-
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	Despreciable
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	Despreciable
Distancia recorrida en dirección longitudinal	Despreciable
Distancia recorrida en dirección transversal	0.6 m

**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 6**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	40 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	60 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.2 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.55 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	11.7 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 7

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	40 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	50 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.1 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.55 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	11 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.15 m

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 8

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	20 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	50 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	20 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	60 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.8 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	Despreciable
Distancia recorrida en dirección longitudinal	6.5 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.4 m

## Tipologías de Atropello para un Furgón comercial

### **CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 1**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	20 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	60 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.3 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	2.5 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	20 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m

### **CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 2**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-20 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	20 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	80
Salto mortal (somersault)	60 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.07 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.93 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	12.4 m
Distancia recorrida en dirección transversal	3.7 m

**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 3**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	20 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	20 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	70 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.05 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.66 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	15 m
Distancia recorrida en dirección transversal	3.4 m

**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 4**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	20 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	60 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.17 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	2.07 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	16.9 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m



**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 5**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	20 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	50 km/h
Salto mortal (somersault)	60 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.34 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	2.6 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	19.8 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.15 m

**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 6**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	20 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	50 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	60 km/h
Salto mortal (somersault)	60 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.9 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.5 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	12 m
Distancia recorrida en dirección transversal	2.3 m

**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 7**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	20 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	60 km/h
Salto mortal (somersault)	50 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.25 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	2.4 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	18.2 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.35 m

**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 8**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	10-80 km/h
Proyección hacia delante (forward projection)	20 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	30 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	60 km/h
Salto mortal (somersault)	60 km/h
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	1.12 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	1.95 m
Distancia recorrida en dirección longitudinal	15.3 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.6 m

## Tipologías de Atropello para un Camión

### **CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 1**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	-
Proyección hacia delante (forward projection)	10-80 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	-
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.6 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	Despreciable
Distancia recorrida en dirección longitudinal	10.4 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m

### **CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 2**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	-
Proyección hacia delante (forward projection)	10-80 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	-
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.67 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	Despreciable
Distancia recorrida en dirección longitudinal	2.6 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.95 m

**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 3**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	-
Proyección hacia delante (forward projection)	10-80 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	-
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.55 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	Despreciable
Distancia recorrida en dirección longitudinal	4.35 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.8 m

**CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 4**

<b>Tipología de Atropello</b>	<b>Velocidad a partir de la cual es apreciable</b>
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	-
Proyección hacia delante (forward projection)	10-80 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	-
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.5 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	Despreciable
Distancia recorrida en dirección longitudinal	8.3 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0 m

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 5

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	-
Proyección hacia delante (forward projection)	10-80 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	10-80 km/h
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	-
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.66 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	Despreciable
Distancia recorrida en dirección longitudinal	6.1 m
Distancia recorrida en dirección transversal	1.7 m

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 6

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	-
Proyección hacia delante (forward projection)	10-80 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	-
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.5 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	Despreciable
Distancia recorrida en dirección longitudinal	8 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0.45 m

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 7

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	-
Proyección hacia delante (forward projection)	10-80 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	-
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.5 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	Despreciable
Distancia recorrida en dirección longitudinal	8 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0.3 m

### CONFIGURACIÓN DE ATROPELLO 8

Tipología de Atropello	Velocidad a partir de la cual es apreciable
Trayectoria de envolvimiento (wrap trajectory)	-
Proyección hacia delante (forward projection)	10-80 km/h
Volteo sobre la aleta (fender vault)	-
Volteo sobre el techo (roof vault)	-
Salto mortal (somersault)	-
<b>Valores estimados tras un atropello a 50 km/h</b>	
Duración del vuelo	0.5 s
Altura máxima alcanzada por el cuerpo del peatón	Despreciable
Distancia recorrida en dirección longitudinal	7.6 m
Distancia recorrida en dirección transversal	0.65 m

## 8.2 ANEXO II

En este segundo anexo se incluyen las tablas de resultados empleados en el Capítulo 5.4.

En las tablas siguientes aparecen los resultados para los principales segmentos corporales que componen el peatón multicuerpo. Los cuerpos denominados como “fémur” y “tibia” son aquellos de forma esférica que el modelo de peatón cuenta para registrar, principalmente, los contactos con el vehículo. Estos están localizados en el centro geométrico de los huesos que forman las extremidades inferiores. Por otro lado, los cuerpos “muslo” y “pantorrilla” son aquellos de forma de alargada que el modelo de peatón cuenta para registrar el resto de contactos, en general.

## *Fuerzas de contacto en el Atropello de un Turismo medio*

### *IMPACTO CON EL VEHÍCULO*

Configuración A			Configuración B			Configuración C			Configuración D			Configuración E			
Segmento Corporal	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo
Cabeza	3927	0.114	Parabrisas	4739	0.124	Parabrisas	5298	0.115	Parabrisas	6908	0.114	Parabrisas	8349	0.126	Parabrisas
Cuello	2598	0.100	Parabrisas	-	-	-	678	0.115	Parabrisas	3597	0.109	Parabrisas	1770	0.117	Parabrisas
Torso	22166	0.096	Parabrisas/ Capó	3894	0.095	Capó	12165	0.085	Capó	19831	0.089	Parabrisas/ Capó	11036	0.100	Capó
Cadera	7121	0.068	Capó	5872	0.062	Capó	7931	0.073	Capó	6567	0.069	Capó	3222	0.075	Capó
Fémur Izquierdo	-	-	Parachoques/ Capó	23197	0.031	Parachoques/ Capó	13626	0.027	Parachoques/ Capó	12505	0.026	Parachoques/ Capó	22989	0.038	Parachoques/ Capó
Fémur Derecho	-	-	Parachoques/ Capó	-	-	-	1280	0.050	Capó	1104	0.046	Capó	-	-	-
Rodilla Izquierda	17676	0.006	Parachoques	19073	0.007	Parachoques	18229	0.007	Parachoques	20656	0.015	Parachoques	13293	0.032	Parachoques
Rodilla Derecha	17676	0.006	Parachoques	13903	0.014	Parachoques	17573	0.021	Parachoques	12335	0.012	Parachoques	12320	0.033	Parachoques
Tibia Izquierda	19375	0.008	Parachoques	19050	0.007	Parachoques	18999	0.007	Parachoques	16826	0.019	Parachoques	25149	0.09	Parachoques
Tibia Derecha	19375	0.008	Parachoques	-	-	-	18568	0.022	Parachoques	25445	0.010	Parachoques	12717	0.041	Parachoques
Muslo Izquierdo	-	-	-	3911	0.014	Parachoques/ Capó	2175	0.024	Parachoques/ Capó	1031	0.060	Capó	6056	0.042	Parachoques/ Capó
Muslo Derecho	-	-	-	8908	0.021	Parachoques/ Capó	2175	0.024	Parachoques/ Capó	2227	0.086	Capó	10036	0.033	Parachoques/ Capó
Pantorrilla Izquierda	4159	0.008	Parachoques	5152	0.017	Parachoques	4351	0.007	Parachoques	3565	0.019	Parachoques	1606	0.033	Parachoques
Pantorrilla Derecha	4159	0.008	Parachoques	5668	0.021	Parachoques	4267	0.022	Parachoques	420	0.013	Parachoques	2829	0.041	Parachoques



## IMPACTO CON EL SUELO

	<b>Configuración A</b>		<b>Configuración B</b>		<b>Configuración C</b>		<b>Configuración D</b>		<b>Configuración E</b>	
Segmento Corporal	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]
<b>Cabeza</b>	3664	1.520	2386	1.304	6708	1.426	5449	1.545	4151	1.315
<b>Cuello</b>	429	1.471	1667	1.308	213	1.459	2156	1.546	1392	1.316
<b>Torso</b>	20935	1.494	11311	1.361	14822	1.489	17039	1.548	15832	1.334
<b>Cadera</b>	9483	1.502	3241	1.407	10506	1.504	11115	1.565	11138	1.337
<b>Fémur Izquierdo</b>	-	-	-	-	-	-	5757	1.626	11723	1.343
<b>Fémur Derecho</b>	-	-	2957	1.420	14372	1.518	-	-	-	-
<b>Rodilla Izquierda</b>	21519	1.578	10181	1.355	17293	1.513	17371	1.628	4240	1.348
<b>Rodilla Derecha</b>	21013	1.574	6621	1.419	5776	1.519	14440	1.505	6058	1.475
<b>Tibia Izquierda</b>	-	-	8854	1.344	15311	1.517	-	-	-	-
<b>Tibia Derecha</b>	-	-	3699	1.434	-	-	-	-	-	-
<b>Muslo Izquierdo</b>	1396	1.591	4978	1.347	4249	1.513	3005	1.627	2875	1.343
<b>Muslo Derecho</b>	1541	1.574	3931	1.480	3602	1.519	1888	1.628	2637	1.413
<b>Pantorrilla Izquierda</b>	-	-	5242	1.341	3508	1.517	1463	1.682	1596	1.308
<b>Pantorrilla Derecha</b>	354	1.956	1984	1.435	1742	1.553	4210	1.461	3055	1.422

## *Fuerzas de contacto en el Atropello de un Monovolumen*

### *IMPACTO CON EL VEHÍCULO*

Configuración A			Configuración B			Configuración C			Configuración D			Configuración E			
Segmento Corporal	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo
Cabeza	7248	0.103	Parabrisas	4609	0.113	Parabrisas	5521	0.112	Parabrisas	5827	0.097	Parabrisas	7406	0.115	Parabrisas
Cuello	3002	0.085	Parabrisas	-	-	-	999	0.100	Parabrisas	2752	0.080	Parabrisas	1520	0.105	Parabrisas
Torso	23869	0.066	Parabrisas/ Capó	11878	0.065	Capó	19318	0.067	Parabrisas/ Capó	15810	0.088	Parabrisas/ Capó	15566	0.084	Parabrisas/ Capó
Cadera	8143	0.047	Capó	9889	0.051	Capó	10474	0.049	Capó	9881	0.057	Capó	4500	0.064	Capó
Fémur Izquierdo	15320	0.031	Parachoques/ Capó	22542	0.034	Parachoques/ Capó	19013	0.033	Parachoques/ Capó	18948	0.028	Parachoques/ Capó	31837	0.042	Parachoques/ Capó
Fémur Derecho	15320	0.031	Parachoques/ Capó	-	-	-	-	-	-	1095	0.047	Parachoques/ Capó	-	-	-
Rodilla Izquierda	15574	0.006	Parachoques	17158	0.006	Parachoques	17764	0.006	Parachoques	17983	0.013	Parachoques	11733	0.010	Parachoques
Rodilla Derecha	15574	0.006	Parachoques	14006	0.015	Parachoques	18347	0.021	Parachoques	12371	0.011	Parachoques	11354	0.025	Parachoques
Tibia Izquierda	20188	0.007	Parachoques	18885	0.007	Parachoques	18913	0.007	Parachoques	18920	0.018	Parachoques	25849	0.009	Parachoques
Tibia Derecha	20188	0.007	Parachoques	-	-	-	18814	0.021	Parachoques	25455	0.009	Parachoques	14480	0.040	Parachoques
Muslo Izquierdo	-	-	-	3800	0.015	Parachoques/ Capó	5128	0.041	Parachoques/ Capó	780	0.059	Parachoques/ Capó	6320	0.046	Parachoques/ Capó
Muslo Derecho	-	-	-	9116	0.026	Parachoques/ Capó	1757	0.023	Parachoques/ Capó	2465	0.071	Parachoques/ Capó	9016	0.025	Parachoques/ Capó
Pantorrilla Izquierda	4097	0.007	Parachoques	6363	0.017	Parachoques	3901	0.007	Parachoques	4035	0.018	Parachoques	5535	0.009	Parachoques
Pantorrilla Derecha	4097	0.007	Parachoques	5684	0.037	Parachoques	3889	0.021	Parachoques	509	0.010	Parachoques	4082	0.038	Parachoques

## IMPACTO CON EL SUELO

Configuración A			Configuración B		Configuración C		Configuración D		Configuración E	
Segmento Corporal	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]
<b>Cabeza</b>	5349	1.697	4824	1.436	4737	1.469	5182	1.564	3003	1.441
<b>Cuello</b>	1928	1.718	1820	1.458	2670	1.486	-	-	206	1.415
<b>Torso</b>	18186	1.691	12592	1.462	16324	1.515	14615	1.582	5902	1.450
<b>Cadera</b>	11434	1.691	8111	1.517	16153	1.525	5707	1.597	10883	1.424
<b>Fémur Izquierdo</b>	14664	1.680	9330	1.533	-	-	-	-	-	-
<b>Fémur Derecho</b>	14871	1.717	-	-	20426	1.524	-	-	5968	1.422
<b>Rodilla Izquierda</b>	9137	1.677	5731	1.535	-	-	8720	1.531	19041	1.327
<b>Rodilla Derecha</b>	2757	1.692	8542	1.552	-	-	29166	1.462	7607	1.359
<b>Tibia Izquierda</b>	8352	1.678	-	-	-	-	6707	1.525	-	-
<b>Tibia Derecha</b>	4909	1.727	2882	1.539	-	-	-	-	3710	1.776
<b>Muslo Izquierdo</b>	3608	1.680	2553	1.534	11722	1.554	-	-	4501	1.450
<b>Muslo Derecho</b>	5218	1.692	5953	1.504	6705	1.525	6206	1.520	6331	1.424
<b>Pantorrilla Izquierda</b>	2299	1.678	1892	1.593	3938	1.623	2079	1.525	4423	1.276
<b>Pantorrilla Derecha</b>	3301	1.729	5197	1.532	3124	1.514	3726	1.406	3879	1.265

## Fuerzas de contacto en el Atropello de un SUV

### IMPACTO CON EL VEHÍCULO

Segmento Corporal	Configuración A			Configuración B			Configuración C			Configuración D			Configuración E		
	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo
<b>Cabeza</b>	10050	0.094	Capó	2733	0.099	Capó	5584	0.107	Capó	8665	0.102	Capó	8124	0.113	Capó
<b>Cuello</b>	3174	0.087	Capó	-	-	-	635	0.352	Capó	1658	0.091	Capó	831	0.103	Capó
<b>Torso</b>	12646	0.077	Capó	1510	0.108	Capó	10061	0.067	Capó	9913	0.076	Capó	6477	0.088	Capó
<b>Cadera</b>	7178	0.034	Capó	11137	0.045	Capó	12675	0.042	Capó	7804	0.042	Capó	9913	0.049	Capó
<b>Fémur Izquierdo</b>	14810	0.017	Parachoques	29367	0.025	Parachoques	14450	0.024	Parachoques	18808	0.018	Parachoques	26990	0.034	Parachoques
<b>Fémur Derecho</b>	14810	0.017	Parachoques	-	-	-	9505	0.042	Parachoques	14214	0.035	Parachoques	-	-	-
<b>Rodilla Izquierda</b>	19955	0.006	Parachoques	20841	0.007	Parachoques	20773	0.007	Parachoques	20183	0.013	Parachoques	20885	0.009	Parachoques
<b>Rodilla Derecha</b>	19955	0.006	Parachoques	17036	0.014	Parachoques	20950	0.021	Parachoques	20724	0.009	Parachoques	10985	0.023	Parachoques
<b>Tibia Izquierda</b>	14130	0.014	Parachoques	15737	0.014	Parachoques	13468	0.013	Parachoques	30974	0.020	Parachoques	35725	0.012	Parachoques
<b>Tibia Derecha</b>	14130	0.014	Parachoques	17117	0.025	Parachoques	14231	0.028	Parachoques	16428	0.012	Parachoques	15011	0.040	Parachoques
<b>Muslo Izquierdo</b>	5925	0.014	Parachoques	23029	0.039	Parachoques	3785	0.014	Parachoques	5673	0.014	Parachoques	6675	0.039	Parachoques
<b>Muslo Derecho</b>	5925	0.014	Parachoques	10544	0.023	Parachoques	2616	0.022	Parachoques	3615	0.059	Parachoques	10560	0.022	Parachoques
<b>Pantorrilla Izquierda</b>	-	-	-	5406	0.025	Parachoques	2469	0.090	Parachoques	2756	0.013	Parachoques	698	0.035	Parachoques
<b>Pantorrilla Derecha</b>	-	-	-	6722	0.027	Parachoques	2550	0.090	Parachoques	-	-	-	2853	0.068	Parachoques

## IMPACTO CON EL SUELO

Configuración A			Configuración B		Configuración C		Configuración D		Configuración E	
Segmento Corporal	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]
<b>Cabeza</b>	3040	1.527	4417	1.163	2376	1.456	2536	1.396	2468	1.281
<b>Cuello</b>	2229	1.564	690	1.174	902	1.513	1416	1.421	320	1.250
<b>Torso</b>	3267	1.565	18907	1.203	4172	1.400	10844	1.424	5047	1.277
<b>Cadera</b>	12500	1.368	8330	1.209	3132	1.648	8907	1.449	5599	1.335
<b>Fémur Izquierdo</b>	3193	1.358	9560	1.258	-	-	-	-	-	-
<b>Fémur Derecho</b>	3675	1.347	-	-	-	-	1782	1.914	-	-
<b>Rodilla Izquierda</b>	13136	0.322	12393	1.260	26990	1.318	7926	1.592	3594	1.751
<b>Rodilla Derecha</b>	12076	1.312	7635	1.392	16467	1.395	22031	1.355	6884	1.412
<b>Tibia Izquierda</b>	14253	1.314	-	-	-	-	1120	1.893	5586	1.132
<b>Tibia Derecha</b>	15602	1.306	4199	1.423	-	-	-	-	7661	1.396
<b>Muslo Izquierdo</b>	6881	1.365	3107	1.260	4159	1.399	3379	1.434	5117	1.278
<b>Muslo Derecho</b>	7341	1.356	2254	1.222	3123	1.541	984	1.445	3752	1.302
<b>Pantorrilla Izquierda</b>	5365	1.313	2499	1.393	4074	1.245	4957	1.441	5082	1.124
<b>Pantorrilla Derecha</b>	5060	1.304	1693	1.424	7263	1.362	7507	1.433	4666	1.395



## *Fuerzas de contacto en el Atropello de un Deportivo*

### *IMPACTO CON EL VEHÍCULO*

	<b>Configuración A</b>			<b>Configuración B</b>			<b>Configuración C</b>			<b>Configuración D</b>			<b>Configuración E</b>		
Segmento Corporal	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo
<b>Cabeza</b>	11196	0.105	Capó	4864	0.112	Capó	9283	0.103	Capó	11357	0.110	Capó	9188	0.126	Capó
<b>Cuello</b>	2864	0.096	Capó	2172	0.16	Capó	977	0.152	Capó	2158	0.103	Capó	1050	0.143	Capó
<b>Torso</b>	17550	0.094	Capó	6601	0.080	Capó	17326	0.086	Capó	14170	0.092	Capó	8937	0.150	Capó
<b>Cadera</b>	4557	0.085	Capó	5875	0.111	Capó	8689	0.081	Capó	4114	0.089	Capó	-	-	-
<b>Fémur Izquierdo</b>	18064	0.036	Parachoques/ Capó	24755	0.041	Parachoques/ Capó	21500	0.042	Parachoques/ Capó	20343	0.049	Parachoques/ Capó	-	-	-
<b>Fémur Derecho</b>	18064	0.036	Parachoques/ Capó	-	-	-	22030	0.058	Parachoques/ Capó	22140	0.047	Parachoques/ Capó	-	-	-
<b>Rodilla Izquierda</b>	-	-	-	15228	0.028	Parachoques	4071	0.046	Parachoques	-	-	-	9571	0.046	Parachoques
<b>Rodilla Derecha</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4956	0.039	Parachoques
<b>Tibia Izquierda</b>	24854	0.017	Parachoques	22072	0.017	Parachoques	18448	0.017	Parachoques	6176	0.034	Parachoques	21600	0.018	Parachoques
<b>Tibia Derecha</b>	24854	0.017	Parachoques	5399	0.046	Parachoques	18304	0.031	Parachoques	25209	0.017	Parachoques	-	-	-
<b>Muslo Izquierdo</b>	2494	0.030	Parachoques/ Capó	4491	0.028	Parachoques/ Capó	4056	0.045	Parachoques/ Capó	1277	0.058	Parachoques/ Capó	3917	0.041	Parachoques/ Capó
<b>Muslo Derecho</b>	2494	0.030	Parachoques/ Capó	5458	0.028	Parachoques/ Capó	3127	0.045	Parachoques/ Capó	2508	0.062	Parachoques/ Capó	2829	0.038	Parachoques/ Capó
<b>Pantorrilla Izquierda</b>	30000	0.024	Parachoques	33200	0.026	Parachoques	31094	0.014	Parachoques	13331	0.024	Parachoques	30767	0.017	Parachoques
<b>Pantorrilla Derecha</b>	30000	0.024	Parachoques	6961	0.032	Parachoques	30458	0.029	Parachoques	2728	0.021	Parachoques	11463	0.042	Parachoques

## IMPACTO CON EL SUELO

	<b>Configuración A</b>		<b>Configuración B</b>		<b>Configuración C</b>		<b>Configuración D</b>		<b>Configuración E</b>	
Segmento Corporal	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]
<b>Cabeza</b>	2778	1.081	3037	1.106	3602	1.057	3267	1.107	3488	1.209
<b>Cuello</b>	915	1.106	1376	1.825	1446	1.048	-	-	1676	1.216
<b>Torso</b>	10782	1.099	8377	1.109	6172	0.982	10886	1.104	8394	1.233
<b>Cadera</b>	8899	1.024	7837	1.113	7004	0.962	8958	1.117	6792	1.280
<b>Fémur Izquierdo</b>	10600	1.710	8329	1.184	-	-	3599	1.415	1737	1.554
<b>Fémur Derecho</b>	-	-	4198	1.105	-	-	-	-	3978	1.748
<b>Rodilla Izquierda</b>	12517	0.932	2203	1.187	2200	0.921	3854	1.056	6150	1.404
<b>Rodilla Derecha</b>	13317	0.938	-	-	9454	0.887	10708	1.003	15766	1.226
<b>Tibia Izquierda</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	9115	1.406
<b>Tibia Derecha</b>	-	-	-	-	-	-	4651	1.119	-	-
<b>Muslo Izquierdo</b>	3249	1.025	2150	1.184	4676	0.950	2625	1.177	-	-
<b>Muslo Derecho</b>	1135	1.171	2290	1.154	3885	0.923	3130	1.153	1885	1.279
<b>Pantorrilla Izquierda</b>	3218	0.903	-	-	2741	0.917	1927	0.996	-	-
<b>Pantorrilla Derecha</b>	3248	0.909	2417	1.138	2764	0.826	2073	0.967	3219	1.144

## *Fuerzas de contacto en el Atropello de un Furgón comercial*

### *IMPACTO CON EL VEHÍCULO*

Configuración A			Configuración B			Configuración C			Configuración D			Configuración E			
Segmento Corporal	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo
Cabeza	8095	0.064	Parabrisas	6226	0.079	Parabrisas	6007	0.080	Parabrisas	7067	0.075	Parabrisas	7024	0.087	Parabrisas
Cuello	4252	0.059	Parabrisas	-	-	-	-	-	-	2342	0.139	Parabrisas	2748	0.080	Parabrisas
Torso	44433	0.043	Capó	33847	0.048	Capó	39294	0.038	Capó	42986	0.033	Capó	39662	0.046	Capó
Cadera	5538	0.045	Parachoques/ Capó	7216	0.039	Parachoques/ Capó	8583	0.039	Parachoques/ Capó	5565	0.038	Parachoques/ Capó	6493	0.044	Parachoques/ Capó
Fémur Izquierdo	28973	0.008	Parachoques	36264	0.017	Parachoques	32096	0.009	Parachoques	39213	0.012	Parachoques	20054	0.014	Parachoques
Fémur Derecho	28973	0.008	Parachoques	-	-	-	24257	0.022	Parachoques	19004	0.013	Parachoques	13021	0.042	Parachoques
Rodilla Izquierda	11533	0.007	Parachoques	25883	0.013	Parachoques	10169	0.006	Parachoques	-	-	-	20533	0.020	Parachoques
Rodilla Derecha	11533	0.007	Parachoques	25269	0.013	Parachoques	17098	0.021	Parachoques	18674	0.010	Parachoques	19475	0.020	Parachoques
Tibia Izquierda	41190	0.016	Parachoques	56264	0.017	Parachoques	37305	0.012	Parachoques	12837	0.021	Parachoques	61891	0.015	Parachoques
Tibia Derecha	41190	0.016	Parachoques	-	-	-	25731	0.023	Parachoques	59769	0.015	Parachoques	5118	0.041	Parachoques
Muslo Izquierdo	7880	0.013	Parachoques	8407	0.013	Parachoques	9946	0.011	Parachoques	1836	0.103	Parachoques	10908	0.025	Parachoques
Muslo Derecho	7880	0.013	Parachoques	7906	0.013	Parachoques	7171	0.021	Parachoques	5081	0.017	Parachoques	11291	0.021	Parachoques
Pantorrilla Izquierda	822	0.035	Parachoques	4679	0.026	Parachoques	4688	0.106	Parachoques	5029	0.044	Parachoques	2310	0.021	Parachoques
Pantorrilla Derecha	822	0.035	Parachoques	6720	0.026	Parachoques	5520	0.106	Parachoques	-	-	-	10697	0.042	Parachoques



## IMPACTO CON EL SUELO

	<b>Configuración A</b>		<b>Configuración B</b>		<b>Configuración C</b>		<b>Configuración D</b>		<b>Configuración E</b>	
Segmento Corporal	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]
<b>Cabeza</b>	3253	1.330	3519	1.160	3530	1.337	1999	1.340	859	1.412
<b>Cuello</b>	889	1.342	732	1.137	547	1.707	-	-	1998	1.705
<b>Torso</b>	23101	1.322	13508	1.172	8269	1.320	7197	1.292	6602	1.400
<b>Cadera</b>	1751	1.322	8220	1.169	9532	1.293	11953	1.275	13807	1.396
<b>Fémur Izquierdo</b>	-	-	7275	1.159	2389	1.494	-	-	-	-
<b>Fémur Derecho</b>	7138	1.988	-	-	654	1.432	14628	1.272	-	-
<b>Rodilla Izquierda</b>	14229	1.361	8223	1.152	10031	1.216	18512	1.200	18213	1.315
<b>Rodilla Derecha</b>	12601	1.364	1298	1.323	17744	1.198	-	-	12198	1.305
<b>Tibia Izquierda</b>	8810	1.369	13042	1.150	-	-	-	-	2723	1.307
<b>Tibia Derecha</b>	9519	1.372	4043	1.279	-	-	-	-	-	-
<b>Muslo Izquierdo</b>	4483	1.350	5380	1.206	6912	1.290	1186	1.292	6658	1.399
<b>Muslo Derecho</b>	3666	1.342	5387	1.206	6588	1.366	6008	1.273	10064	1.393
<b>Pantorrilla Izquierda</b>	2565	1.370	3208	1.149	1935	1.503	4723	1.169	3908	1.287
<b>Pantorrilla Derecha</b>	2601	1.373	2810	1.278	3413	1.163	1577	1.180	3088	1.241



## *Fuerzas de contacto en el Atropello de un Camión*

### *IMPACTO CON EL VEHÍCULO*

	Configuración A			Configuración B			Configuración C			Configuración D			Configuración E		
Segmento Corporal	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Zona de Contacto del Vehículo
<b>Cabeza</b>	7027	0.024	Parabrisas	6664	0.035	Parabrisas	6712	0.035	Parabrisas	6863	0.037	Parabrisas	6966	0.040	Parabrisas
<b>Cuello</b>	3053	0.022	Parabrisas	968	0.032	Parabrisas	981	0.031	Parabrisas	2328	0.036	Parabrisas	2534	0.040	Parabrisas
<b>Torso</b>	31336	0.019	Capó	23642	0.022	Capó	23958	0.028	Capó	22814	0.040	Capó	25233	0.043	Capó
<b>Cadera</b>	14824	0.017	Capó	14716	0.021	Capó	13533	0.024	Capó	13595	0.021	Capó	13644	0.028	Capó
<b>Fémur Izquierdo</b>	23611	0.010	Parachoques	27412	0.022	Parachoques	26058	0.015	Parachoques	29679	0.024	Parachoques	15568	0.020	Parachoques
<b>Fémur Derecho</b>	23611	0.010	Parachoques	-	-	-	-	-	-	9200	0.027	Parachoques	-	-	-
<b>Rodilla Izquierda</b>	11620	0.007	Parachoques	25383	0.019	Parachoques	11759	0.012	Parachoques	2856	0.024	Parachoques	16855	0.024	Parachoques
<b>Rodilla Derecha</b>	11620	0.007	Parachoques	25032	0.019	Parachoques	21221	0.027	Parachoques	13403	0.022	Parachoques	15174	0.024	Parachoques
<b>Tibia Izquierda</b>	22352	0.009	Parachoques	20815	0.013	Parachoques	18365	0.013	Parachoques	14642	0.029	Parachoques	26225	0.010	Parachoques
<b>Tibia Derecha</b>	22352	0.009	Parachoques	-	-	-	19401	0.027	Parachoques	25819	0.019	Parachoques	14528	0.045	Parachoques
<b>Muslo Izquierdo</b>	5996	0.010	Parachoques	8314	0.022	Parachoques	7672	0.018	Parachoques	7775	0.023	Parachoques	8070	0.031	Parachoques
<b>Muslo Derecho</b>	5996	0.010	Parachoques	11597	0.021	Parachoques	6374	0.026	Parachoques	2732	0.025	Parachoques	12155	0.024	Parachoques
<b>Pantorrilla Izquierda</b>	-	-	-	6206	0.019	Parachoques	3875	0.012	Parachoques	1684	0.025	Parachoques	2306	0.080	Parachoques
<b>Pantorrilla Derecha</b>	-	-	-	9407	0.053	Parachoques	7000	0.068	Parachoques	264	0.026	Parachoques	12857	0.062	Parachoques

IMPACTO CON EL SUELO

	<b>Configuración A</b>		<b>Configuración B</b>		<b>Configuración C</b>		<b>Configuración D</b>		<b>Configuración E</b>	
Segmento Corporal	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]	Fuerza de Contacto [N]	Tiempo [s]
<b>Cabeza</b>	1645	0.673	1338	0.526	2562	0.565	3187	0.637	3000	0.563
<b>Cuello</b>	-	-	490	1.871	-	-	237	1.669	-	-
<b>Torso</b>	4186	0.628	4873	0.553	4120	0.618	7556	0.638	8524	0.536
<b>Cadera</b>	10525	0.601	4314	0.503	10000	0.545	5200	0.534	945	0.519
<b>Fémur Izquierdo</b>	8508	0.613	4394	0.493	8665	0.586	16654	0.521	2541	0.847
<b>Fémur Derecho</b>	8182	0.614	6000	0.561	-	-	-	-	250	0.753
<b>Rodilla Izquierda</b>	1382	0.628	7442	0.436	2925	0.595	2513	0.743	-	-
<b>Rodilla Derecha</b>	2046	0.626	8763	0.443	2300	0.672	6140	0.453	2546	0.519
<b>Tibia Izquierda</b>	-	-	-	-	1230	0.589	-	-	-	-
<b>Tibia Derecha</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	2323	0.534
<b>Muslo Izquierdo</b>	2441	0.630	3485	0.502	2951	0.606	4522	0.524	1638	0.527
<b>Muslo Derecho</b>	2432	0.629	4728	0.561	3441	0.601	3104	0.572	2227	0.882
<b>Pantorrilla Izquierda</b>	1808	0.570	944	0.435	1144	0.589	1620	0.529	1039	0.535
<b>Pantorrilla Derecha</b>	1828	0.569	929	0.442	372	0.634	1031	0.639	1480	0.535

## 8.3 ANEXO III

En este tercer anexo se indica el contenido que se recoge en los dos discos adjuntos a este Proyecto Fin de Carrera. En las diferentes carpetas de cada uno de los vehículos, están ordenados los archivos generados durante la fase de simulación con el programa PC-CRASH v.8. Los archivos de las simulaciones no utilizadas finalmente en este Proyecto se incluyen en las carpetas denominadas "*Simulaciones no consideradas*".

### **Estructura del DVD 1**

Mi disco

DVD 1

Simulaciones Capítulo 5.3

DEPORTIVO

MONOVOLUMEN

TURISMO MEDIO

Simulaciones Capítulo 5.4

DEPORTIVO

Simulaciones no consideradas

Sin secuencia de frenada

MONOVOLUMEN

Simulaciones no consideradas

Sin secuencia de frenada

TURISMO MEDIO

Simulaciones no consideradas

Sin secuencia de frenada

Nombre	Tamaño	Tipo
Simulaciones Capítulo 5.3	2.841.803 KB	Carpeta de archivos
Simulaciones Capítulo 5.4	1.228.936 KB	Carpeta de archivos

### **Estructura del DVD 2**

Mi disco

DVD 2

Simulaciones Capítulo 5.3

CAMION

FURGÓN COMERCIAL

SUV

Simulaciones Capítulo 5.4

CAMION

Simulaciones no consideradas

Sin secuencia de frenada

FURGÓN COMERCIAL

Simulaciones no consideradas

Sin secuencia de frenada

SUV

Simulaciones no consideradas

Sin secuencia de frenada

Nombre	Tamaño	Tipo
Simulaciones Capítulo 5.3	2.106.446 KB	Carpeta de archivos
Simulaciones Capítulo 5.4	1.227.027 KB	Carpeta de archivos